



Universidad
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Bioingeniería e Ingeniería
Aeroespacial

INGENIERÍA TÉCNICA DE
TELECOMUNICACIÓN

“Desarrollo de interfaz de calibración para sistema tomográfico SPECT de animales de laboratorio”

Autor: Gabriela Estefanía Zamora Cuichán.

Tutor: Dr. Eduardo Lage Negro.

Ponente: Dr. Juan José Vaquero López.

Leganés, 31 enero del 2012

Título: Desarrollo de interfaz de calibración para sistema tomográfico SPECT de animales de laboratorio.
Autor: Gabriela Estefanía Zamora Cuichán.
Tutor: Dr. Eduardo Lage Negro.
Unidad de Medicina y Cirugía Experimental.
Hospital General Universitario Gregorio Marañón.
Ponente: Dr. Juan José Vaquero López.
Departamento Bioingeniería e Ingeniería Aeroespacial.

EL TRIBUNAL

Presidente: Mónica Abella

Secretario: Javier Pascau

Vocal: Julio Villena

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 31 de Enero de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de 10 - Matrícula

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



El presente proyecto de fin de carrera se ha realizado en colaboración con el Departamento de Bioingeniería de la Universidad Carlos III de Madrid con el Dr. Juan José Vaquero López como ponente.

El proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio de Imagen de la Unidad de Medicina y Cirugía Experimental del Hospital Gregorio Marañón bajo la dirección del Dr. Eduardo Lage Negro, grupo vinculado a dicho departamento en virtud del acuerdo firmado en 2009 entre la Universidad Carlos III de Madrid y la Consejería de Salud de la Comunidad de Madrid.

Agradecimientos:

A mis padres, por enseñarme que luchando y persiguiendo día tras día es posible alcanzar un sueño. Gracias madre por regalarme aquellas noches duras de trabajo y afrontar con fortaleza y sabiduría las adversidades del tiempo.

A mis hermanas Joyce y Karen por soportar aquellos duros días de estudio y colaborar con mis tareas.

A Carmen y Vero por enseñarme que en la vida no sólo es importante ser una gran profesional, si no también ser una gran persona. Gracias por compartir vuestra paciencia y sabiduría.

A José por creer en mí y confiar en que en un día no muy lejano lo alcanzaré. Sin duda agradezco cada palabra alentadora que aumentaba mi seguridad y confianza día a día.

A mi familia materna, porque su ayuda ha permitido que estemos donde estamos, es verdad cuando decimos que la unión hace la fuerza y ante momentos difíciles nuestra unión ha hecho que una guerra sea tan sólo una batalla.

A mis compañeros de clase por compartir vuestros apuntes, sabiduría y tiempo. Sin duda Aurora se lleva mención especial por trabajar codo con codo luchando y animándonos por conseguir nuestros objetivos.

Al laboratorio LIM por instruirme y guiarme hacia el final del túnel.

Finalmente decir:

“Cuando desees algo el universo entero conspira para que puedas realizar tu sueño.”

Paulo Coelho - El Alquimista

Resumen:

SPECT es una modalidad no invasiva de diagnóstico por imagen, utilizada en la actualidad con fines clínicos principalmente en oncología, cardiología y neurología. En el Laboratorio de Imagen Médica del Hospital Gregorio Marañón se está desarrollando un sistema denominado FSPECT diseñado para aplicar esta técnica en animales de laboratorio.

El presente PFC tiene como objetivo la implementación de una herramienta software que permita realizar las correcciones o calibraciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema FSPECT, ofreciendo al usuario final una interfaz sencilla de manejar que le permita abstraerse del procesado interno realizado.

La aplicación implementada permite llevar a cabo correcciones en tres subsistemas del aparato. Estos son la electrónica de adquisición de datos, los elementos detectores y la geometría de adquisición. En cada etapa de corrección se parte de un conjunto de datos que se procesan con la aplicación desarrollada para generar ficheros de corrección que se aplicarán sobre los datos adquiridos de forma subsecuente en el aparato.

Abstract:

SPECT is a non-invasive diagnostic imaging technique, with clinical application in oncology, cardiology and neurology among other areas. In the Medical Image Laboratory at Hospital General Universitario Gregorio Marañón a system denominated FSPECT is being developed which has been designed to apply this technique to small laboratory animals.

The objective of this work is the implementation of a software tool for the calibration of the FSPECT system. The idea is to provide the user with a simple interface to acquire calibration data and to generate the calibration files required for the appropriate usage of this system.

The application implemented allows the user to acquire calibration data and to obtain calibration files for three differentiated parts of the FSPECT. These are: Data acquisition electronics, detector elements and mechanical system (geometry errors due to mechanics tolerances). Each one of the correction stages calibration data are acquired, following predefined procedures and processed with the developed application to obtain correction files, which will be applied to the subsequently acquired data.

INDICE

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	14
2. INTRODUCCIÓN A LA TÉCNICA SPECT	15
2.1 INTRODUCCIÓN	15
2.2 SPECT PARA ANIMALES	16
2.3 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SPECT	17
2.3.1 Interacción de los rayos gamma con la materia	17
2.3.2 La gamma cámara y sus componentes.	18
2.3.3 Interacción entre los fotones gamma y el material centellador	22
2.3.4 SPECT	25
2.4 ESTADO DEL ARTE	29
3 SISTEMA FSPECT	32
3.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA	32
3.2 SISTEMA MECÁNICO	32
3.2.1 Correcciones asociadas al sistema mecánico	34
3.3 SISTEMA DE DETECCIÓN	35
3.3.1 Correcciones asociadas al sistema de adquisición	36
3.3.2 Correcciones asociadas a los elementos detectores.	37
3.4 INTERFAZ DE USUARIO	37
4.- DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CALIBRACIÓN FSPECT	39
4.1 INTRODUCCIÓN	39
4.2 ACQ SYSTEM	39
4.2.1 Explicación de las correcciones	39
4.2.2 Módulo de comunicación	41
4.2.3 Ficheros de entrada y salida	42
4.2.4 Desarrollo del software de calibración por pedestales.	43
4.2.5 Implementación de la calibración para la corrección de pedestales y timeshift	46

4.3 DETECTORS	50
4.3.1 Explicación teórica de la corrección	50
4.3.2 Módulos de comunicación	50
4.3.3 Ficheros de entrada y salida	51
4.3.4 Desarrollo del software de calibración por no uniformidad y picos de energía	51
4.3.5 Implementación de la calibración para la corrección de no uniformidad y los picos de energía desalineados.	67
4.4 PINHOLE GEOMETRY	73
4.4.1 Explicación teórica	73
4.4.2 Modulo de comunicación	73
4.4.3 Ficheros de entrada y salida	74
4.4.4 Desarrollo del software de calibración por pinhole geometry	75
4.4. Implementación de la calibración para la corrección pinhole	80
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	82
5.1 CONCLUSIONES	82
5.2 LÍNEAS FUTURAS	82
6. DIAGRAMA DE GANTT Y PRESUPUESTO	83
6.1 PRESUPUESTO DEL SOFTWARE DE CALIBRACIÓN DENTRO DEL LIM.	83
6.2 DIAGRAMA DE GANT Y ESTIMACIÓN TEMPORAL.	84
7. ANEXO	86
7.1 FICHERO DE ENTRADA Y SALIDA	86
7.1.1 Ficheros de entrada	87
7.1.2 Ficheros de salida	90
7.2 RUTAS FICHEROS	96
7.3 PARÁMETROS PINHOLECALIBRATION.EXE	96
7.4 PARÁMETROS MATRIXGENERATIONPINHOLE.EXE	97

LISTADO DE ACRÓNIMOS

- ACK.-** Acknowledgement, asentimiento.
- ADC.-** Analog to Digital Converter, Convertidor analógico-digital.
- API.-** Application Programming Interface, Interfaz de programación de aplicaciones.
- ASCII.-** American Standard Code for Information Interchange, Código estándar americano para el intercambio de información
- CFOV.-** Central Field Of View, Campo de visión central.
- CT.-** Computed Tomography, Tomografía Computarizada.
- DC.-** Direct Current, Corriente continua.
- eV.-** Electrón-Volt, Electrón-voltio.
- FBP.-** Filtered Back Projection, Retroproyección filtrada.
- FIFO.-** First In First Out; Primero que entra, primero que sale.
- FOV.-** Field Of View, Campo de vision.
- FWHM.-** Full Width at Half Maximum, Anchura a la mitad del máximo.
- IDL.-** Interactive Data Language, Lenguaje de datos interactivo.
- LED.-** Light-emitting diode, Diodo emisor de luz.
- LSF.-** Line Spread Function, Función de dispersión lineal.
- ML.-** Maximum Likelihood, Máxima verosimilitud.
- MMWKS.-** Multimodality work station
- MRI.-** Magnetic Resonance Imaging, Imagen de resonancia magnética.
- PC.-** Personal Computer, Ordenador personal.
- PET.-** Positron Emission Tomography, Tomografía por emisión de positrones.
- PHA.-** Pulse Height Analyzer, Analizador de altura de pulso.
- PMT.-** Photomultiplier Tube, Tubo fotomultiplicador.
- PSF.-** Point Spread Function, Función de dispersión puntual.
- PS-PMT.-** Position Sensitive Photomultiplier Tube, Tubo fotomultiplicador sensible a posición.
- RAM.-** Random Access Memory, Memoria de acceso aleatorio.
- ROI.-** Region of Interest, Región de interés.
- ROM.-** Read Only Memory, Memoria de solo lectura.
- SNR.-** Signal to Noise Ratio, Relación señal a ruido.

SPECT.- Single Photon Emission Computed Tomography, Tomografía Computarizada por Emisión de Fotón Único.

UFOV.- Useful Field of View, Campo de vision útil.

ÍNDICE DE IMÁGENES

Fig 2.1	Imagen funcional e imagen anatómica realizada mediante técnica SPECT.
Fig 2.2	Corte axial de un estudio volumétrico realizado mediante la técnica SPECT.
Fig 2.3	Estudios preclínicos.
Fig 2.4	Esquema fundamental de la absorción de energía.
Fig 2.5	Esquema fundamental de la dispersión COMPTOM.
Fig 2.6	Componentes de la gamma cámara.
Fig 2.7	Esquema de detección de los rayos gamma.
Fig 2.8	Colimador pinhole.
Fig 2.9	Geometría de adquisición utilizando un colimador pinhole
Fig 2.10	Colimador parallel-hole.
Fig 2.11	Fotomultiplicadores.
Fig 2.12	Esquema de interacción de un solo fotón en un detector básico.
Fig 2.13	Características de una distribución de energía típica.
Fig 2.14	Distribución de energía característica.
Fig 2.15	FOV, UFOV, VFOV.
Fig 2.16	Adquisición de imagen en distintas posiciones angulares.
Fig 2.17	Reconstrucción por retroproyección.
Fig 2.18	No linealidad en la imagen.
Fig 2.19	No uniformidad.
Fig 2.20	Alineamiento de los espectros de energía.
Fig 2.21	Máquina USPECT.
Fig 3.1	Diagrama de bloques del sistema FSPECT.
Fig 3.2	Caja controladora de motores.
Fig 3.3	Vista frontal y coordenadas de FSPECT.
Fig 3.4	Vista posterior de la máquina FSPECT.
Fig 3.5	Maniquí utilizado para la calibración geométrica del aparato cuando este se equipa con colimadores pinhole.
Fig 3.6	Elemento detector.
Fig 3.7	Colimador de agujeros paralelos y colimador de tipo pinhole.
Fig 3.8	PC de control.
Fig 3.9	Sistema de adquisición de datos con el ADC y QuickUSB.
Fig 3.10	Imagen no uniforme y uniforme.
Fig 3.11	Bloques de la interfaz de usuario.
Fig 3.12	Interfaz inicial del sistema FSPECT.
Fig 4.1	Representación del pedestal para un canal cualquiera.
Fig 4.2	Protocolo de comunicación en ACQ-SYSTEM.
Fig 4.3	Ficheros de entrada y salida de ACQ-SYSTEM.
Fig 4.4	Ventana para corregir las componentes offsets.
Fig 4.5	Ventana mostrada durante la adquisición para calibrar la Electrónica.
Fig 4.6	Tabla de las posiciones máximas de los canales y FWHM.
Fig 4.7	Representación del timestamp.
Fig 4.8	Representación del TDC del valor obtenido para cada TDC por detector.
Fig 4.9	Tabla de resultado del TDC.
Fig 4.10	Texto de información de éxito.
Fig 4.11	Cuadro de información.
Fig 4.12	Cuadro de información para FWHM.
Fig 4.13	Protocolo de comunicación en DETECTORS.
Fig 4.14	Ficheros de entrada y salida en DETECTORS.
Fig 4.15	Ventana que muestra la calibración para DETECTORS.
Fig 4.16	Instrucciones para una nueva adquisición de datos.
Fig 4.17	Zona informativa del estado de adquisición con la máquina FSPECT.
Fig 4.18	Campos leídos desde el fichero .ACQ.
Fig 4.19	Ventana para la incorrecta lectura del fichero lut.

Fig 4.20	Selección del detector.
Fig 4.21	Representación de la imagen de llenado de campo y rejilla de ajuste asociado.
Fig 4.22	ZOOM de la imagen de llenado de campo.
Fig 4.23	Visualización de cuentas de los 4 canales en representación logarítmica y timestamp.
Fig 4.24	Crystal Histogram.
Fig 4.25	Espectro de energía al que se le ha aplicado la corrección de los picos de energía para un cristal.
Fig 4.26	Espectro de energía alineado y ajustado para el detector 1.
Fig 4.27	Tabla con las cuentas por píxel, la uniformidad integral sin corregir y corregida, promedio de la resolución de energía, y energía mejor y peor para cada caso.
Fig 4.28	Mensaje del fichero de calibración generado correctamente.
Fig 4.29	Mensaje que nos pregunta si deseamos sobrescribir el fichero de calibración.
Fig 4.30	Mensaje de confirmación. Envío correcto del fichero archives.txt.
Fig 4.31	Informa del envío correcto del fichero de calibración para el detector 1.
Fig 4.32	Tabla que muestra los resultados de: cuentas por píxel, la uniformidad integral sin corregir y corregida, promedio de la resolución de energía, y energía mejor y peor para cada caso.
Fig 4.33	Información de lo que se procesa en la aplicación.
Fig 4.34	Ventana para generar un nuevo fichero lut.
Fig 4.35	Factor que nos indica que se han detectado 778 cristales, faltando por seleccionar 122 cristales.
Fig 4.36	Imagen activada la ecualización.
Fig 4.37	Imagen de llenado de campo ajustada a cristales, (drch) Imagen Lut.
Fig 4.38	Imagen que nos indica que el algoritmo ha fallado
Fig 4.39	Ventana al pulsar SAVE_LUT, se introduce un nombre sin Extensión.
Fig 4.40	Mensaje que indica el envío correcto del fichero archives.txt
Fig 4.41	Informa del envío correcto del fichero de calibración.
Fig 4.42	Mensaje de error, envío incorrecto del fichero lut.
Fig 4.43	Imagen corregida por uniformidad y con los máximos desplazados
Fig 4.44	Maniquí de calibración para geometry pinhole.
Fig 4.45	Protocolo de comunicación en PINHOLE GEOMETRY.
Fig 4.46	Ficheros de entrada y salida en PINHOLE GEOMETRY.
Fig 4.47	Ventana principal de la calibración modo Pinhole Geometry.
Fig 4.48	Ventana de adquisición modo pinhole geometry.
Fig 4.49	Zona informativa del estado de adquisición con la máquina FSPECT.
Fig 4.50	Imagen con las proyecciones calibradas.
Fig 4.51	Parámetros que se incluyen en la creación de la matriz.
Fig 4.52	Imagen final que obtenemos al realizar la calibración Pinhole Geometry.
Fig 7.1	Esquema de ficheros de entrada y salida.
Fig 7.2	LUT.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Sistemas comerciales SPECT para animales de laboratorio
Tabla 2	Fichero ACQ
Tabla 3	Fichero archives.txt
Tabla 4	Fichero de calibración
Tabla 5	Fichero de salida para la calibración electrónica
Tabla 6	Resultado práctico de la calibración por pedestales
Tabla 7	Resultado práctico de la calibración pinhole geometry Parameter.txt
Tabla 8	Resultado práctico de la calibración pinhole geometry Center.txt
Tabla 9	Rutas de ficheros
Tabla 10	Parámetros de entrada y salida PinholeGeomtryCalibration.exe
Tabla 11	Parámetros de entrada y salida MatrixGenerationPinhole.exe
Tabla 12	Presupuesto estimado del proyecto
Tabla 13	Diagrama Gantt
Tabla 14	Periodo de tareas

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Justificación

En el Laboratorio de Imagen Médica del hospital Gregorio Marañón de Madrid, se ha desarrollado recientemente un prototipo de escáner SPECT para animales de laboratorio [3]. La empresa SEDECAL S.A. Se ha mostrado interesada en distribuirlo comercialmente y por ello se está trabajando con ellos en la implementación de la versión comercial de este aparato cuyo nombre será FSPECT.

Objetivos

Desarrollar la interfaz de calibración del sistema FSPECT. Esta debe ser capaz de:

- Permitir al usuario adquirir datos de calibración para el sistema.
- Generar los archivos de calibración adecuados a partir de los datos adquiridos.
- Evaluar el estado de los archivos de calibración actuales del aparato.

2. INTRODUCCIÓN A LA TÉCNICA SPECT

2.1 INTRODUCCIÓN

El término SPECT proviene del acrónimo de "Single Photon Emission Computed Tomography", que significa "Tomografía computarizada por emisión de fotón único". SPECT es una modalidad no invasiva de diagnóstico por imagen que permite visualizar la distribución tridimensional de un contraste radiactivo localizado en un volumen u órgano de interés.-

Mediante esta técnica es posible obtener imágenes 2,3 o 4 (4 dimensión es el tiempo) dimensiones del sujeto bajo estudio que representaran, según el radiofármaco empleado, alguna característica funcional de interés como pueda ser la concentración de neuroreceptores o la actividad metabólica de una lesión conocida o sospechada.

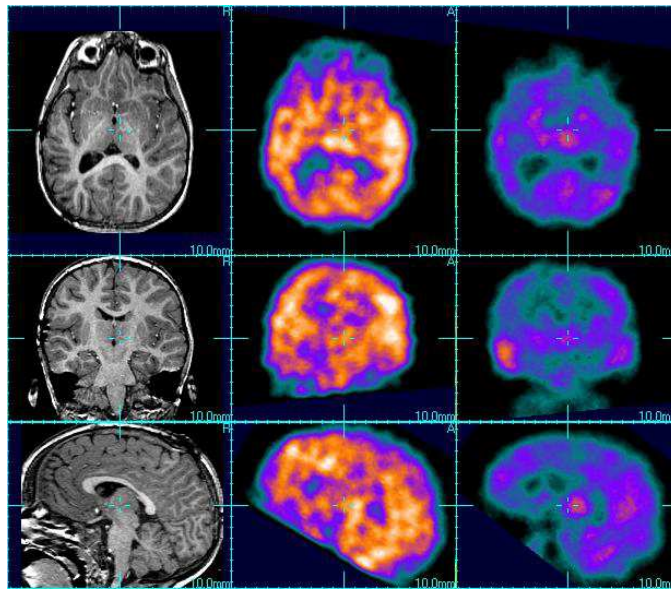


Fig 2.1.- Imagen anatómica de un paciente adquirida en una resonancia magnética (izquierda) e imágenes funcionales adquiridas con SPECT (centro y derecha) . La fila central y la de la derecha representan estudios SPECT de un mismo paciente usando un radiotrazador diferente. Las zonas de mayor brillo, representan mayor concentración del agente utilizado

La administración del radiofármaco o trazador se realiza vía intravenosa y se distribuye por el cuerpo del paciente según su flujo sanguíneo. El trazador emite radiación ionizante que es registrada externamente mediante un detector de radiación gamma que es tratada mediante medios informáticos para la obtención de imágenes.

Las imágenes obtenidas permiten la observación in vivo de múltiples fenómenos biológicos y bioquímicos permitiendo la investigación de los hechos que ocurren a nivel celular. Por ejemplo es posible confirmar la presencia de cáncer o metástasis en alguna zona del organismo a pesar de que esta haya pasado desapercibida en una tomografía computarizada o una resonancia magnética.

Por todo esto, la técnica SPECT es aplicable al estudio de funciones biológicas como puedan ser la viabilidad celular, determinación de flujo sanguíneo o perfusión, densidad y ocupación de neuroreceptores o actividad metabólica. También cabe destacar su aplicación tanto al desarrollo de nuevos fármacos más potentes y eficaces como a la investigación biológica básica. [1]

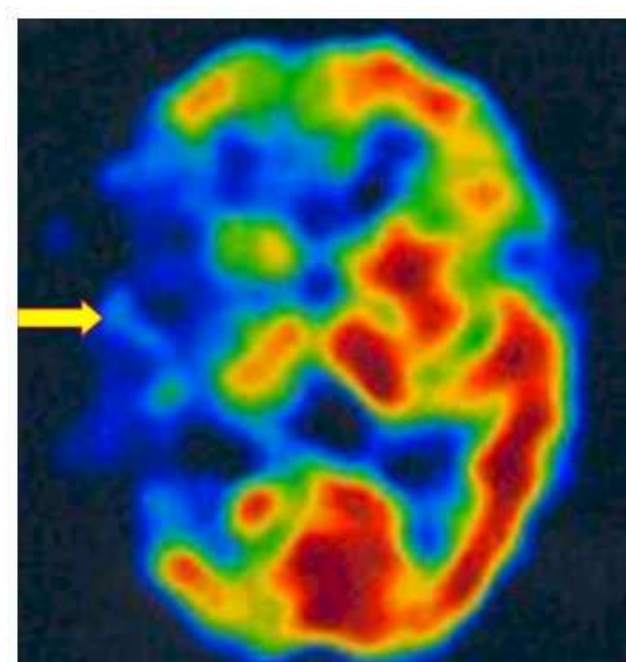


Fig 2.2.- Corte axial de un estudio volumétrico realizado mediante la técnica SPECT, sobre un paciente con un infarto extenso del territorio de la arteria cerebral media estrecha. Los colores de la imagen representan diferentes niveles de captación del trazador (colores más cálidos equivalen a mayor concentración)

2.2 SPECT PARA ANIMALES



Fig 2.3.- Estudios preclínicos

El equipamiento de diagnóstico preclínico, además de su utilidad intrínseca en la investigación científica y para el desarrollo de nuevos fármacos, permite la experimentación de nuevas técnicas de imagen y la optimización de las ya existentes.

Una vez demostrada la utilidad e inocuidad de las técnicas de imagen más avanzadas para ciertas aplicaciones de diagnóstico con estos sistemas preclínicos, estas técnicas se trasladan al campo clínico. Este proceso de comprobación y optimización, que se conoce como investigación traslacional, resulta lento y costoso pero es un paso necesario para poder utilizar estas técnicas en entornos clínicos. Los equipos de investigación animal agilizan el proceso de validación y junto con la aparición de nuevas moléculas de diagnóstico, están facilitando la investigación de los efectos farmacológicos de nuevos compuestos para la quimioterapia, Alzheimer, entre otros. [2].

Por otra parte, aunque la SPECT es una técnica que se utiliza en la práctica clínica, no es posible utilizar las máquinas de humanos con pequeños animales de laboratorio. Es necesario utilizar máquinas específicamente diseñadas para animales con resolución espacial y sensibilidad adaptadas.

2.3 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SPECT

2.3.1 Interacción de los rayos gamma con la materia

Absorción fotoeléctrica

Se trata de un mecanismo en el cual un fotón desaparece al ceder a un átomo de la materia con la que interacciona toda su energía. La energía absorbida por el átomo se libera mediante la eyección de un electrón orbital que recibe el nombre de fotoelectrón. La energía cinética (E_e) con la que sale despedido el fotoelectrón es igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente (E_γ) y la energía del orbital donde se encontraba el electrón eyectado (E_k), según indica la ecuación:

$$(1) \quad E_e = E_\gamma - E_k$$

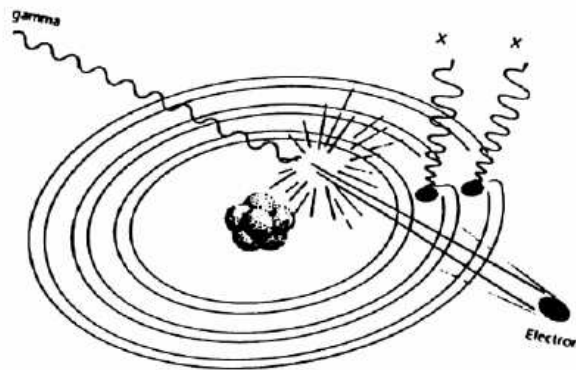


Fig 2.4 .- Esquema fundamental de la absorción de energía

Este proceso crea en el átomo donde ocurre, la vacante de un electrón que dará lugar a la emisión de rayos X característicos (o electrones de Auger) (figura 2.4). Esta interacción se produce entre el fotón y el átomo en conjunto, no dándose con electrones libres. Para rayos γ de unos pocos cientos de KeV, el fotoelectrón portará la mayoría de la energía del fotón originario.

Dispersión Compton

Este proceso tiene lugar entre un rayo γ y un electrón de un orbital externo del átomo con el que interacciona. En la dispersión Compton, la energía del fotón incidente será mayor que la energía necesaria para liberar el electrón del orbital. En este caso, el fotón transfiere parte de su energía al electrón, que será liberado del orbital en el que se encuentra, y es desviado un ángulo θ con respecto a su dirección original (figura 2.5). La energía transferida en el choque, dependerá del ángulo con el que es desviado el fotón, pudiendo ésta variar desde cero hasta gran parte de la energía del fotón incidente. La probabilidad de que

sea este fenómeno el que ocurra es dependiente del número de electrones disponibles como objetivo para la dispersión, con lo que aumenta linealmente con el número atómico del material absorbente.

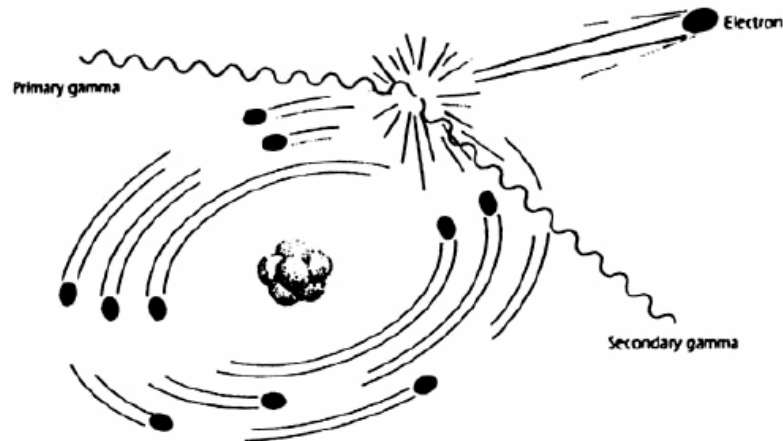


Fig 2.5 .- Esquema fundamental de la dispersión COMPTON

2.3.2 La gamma cámara y sus componentes.

Por ser de gran importancia para la comprensión del proyecto en el presente capítulo introduciremos algunas descripciones básicas del tipo de detector utilizado: la gamma cámara o cámara de Anger. [1]-[6]

La gamma cámara está formada por un colimador, uno o varios cristales centelleadores, una guía de luz, y una matriz de tubos fotomultiplicadores [6].

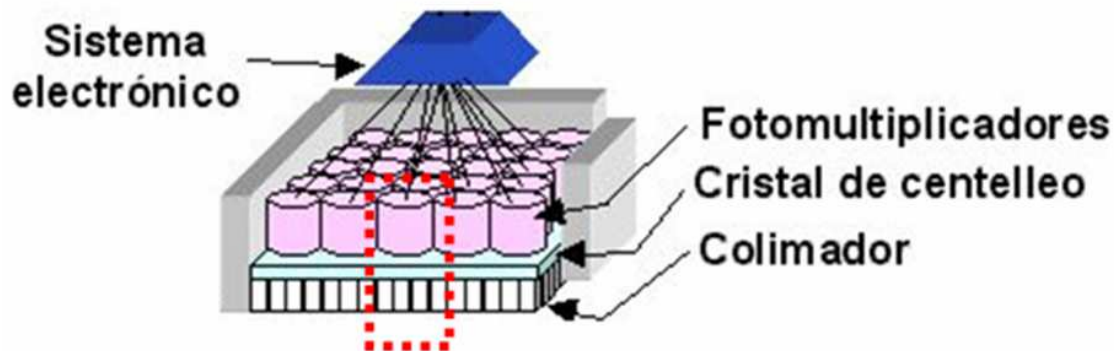
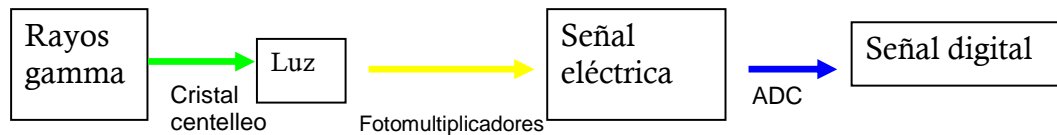


Fig 2.7 .- Componentes principales de la gamma cámara

Básicamente, el proceso de detección de un fotón se puede ver como una doble transducción, primero por parte de un cristal de centelleo que transformará los fotones gamma incidentes en fotones de luz y después por parte del tubo fotomultiplicador y su electrónica asociada que se encargaran de transducir estos fotones de luz en señales eléctricas, que contendrán información de la posición de recepción del fotón (siempre y cuando un tubo sea sensible a posición) y de la energía del mismo. Las señales de los tubos fotomultiplicadores alimentan los circuitos de posicionamiento analógicos o digitales que determinan la posición de cada evento detectado.



A su vez cada evento es procesado por circuitos analizadores de altura de pulso (*PHA – Pulse height analyzer*) que se encargan de discriminar los fotones que no alcanzan o sobrepasan una determinada amplitud (la amplitud de las señales de salida de la cámara es proporcional a la energía depositada por el rayo gamma que la generó). Cuando un evento se produce dentro de la ventana de energía seleccionada, se realiza la transferencia de las señales de posición X e Y al ordenador. Se requiere un gran número de eventos para formar una imagen interpretable porque cada píxel debe tener un número de cuentas suficiente para alcanzar un nivel señal-ruido aceptable.



Fig 2.8.- Esquema de detección de los rayos gamma.

A continuación, se incluye una explicación más descriptiva de los componentes de la gamma cámara.

2.3.2.1 Colimadores

La función principal del colimador es determinar la dirección de los rayos y detectados. Para obtener una imagen con una gamma cámara es necesario conocer la información direccional de los rayos y que recibe el detector. Los rayos γ no pueden ser enfocados, por lo que no puede aplicarse un principio similar al de la lente utilizado en fotografía. En la práctica, los sistemas de generación de imagen con rayos γ emplean el principio de colimación absorbente para formar la imagen. Un colimador absorbente proyecta una imagen de la distribución fuente en el detector, permitiendo que solo aquellos rayos γ que viajan en una determinada dirección, alcancen el detector.

Se usan dos tipos básicos de colimadores en la gamma cámara: pinhole, parallel hole (o colimador de agujeros paralelos).

Un **colimador pinhole** (figura 2.8) consiste en una pieza cónica de plomo, tungsteno, platino, u otro metal pesado absorbente, con una pequeña apertura. Ésta, se localiza al final del cono de plomo o tungsteno, a

una distancia del detector que depende del FOV del mismo. El tamaño del agujero suele ser de unos pocos milímetros [6]- [8].

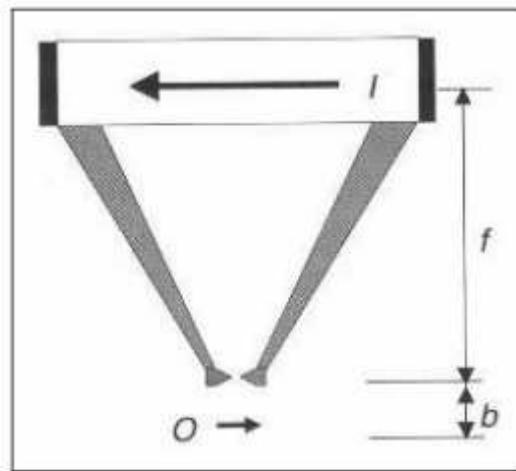


Fig 2.8.- Colimador pinhole

Los rayos γ que pasan a través de la apertura proyectan una imagen invertida de la distribución de la fuente sobre el cristal detector.

Su principal ventaja es que ofrece una imagen ampliada del objeto si este queda muy próximo al colimador (órganos superficiales), en caso contrario produce una imagen reducida. En concreto, la imagen se magnifica cuando la distancia b , entre la fuente y la apertura, es menor que la longitud f , del cono del colimador. El tamaño de la imagen I y el del objeto O (fuente) están relacionados de acuerdo con la expresión:

$$(2) \quad \frac{I}{O} = \frac{f}{b}$$

El tamaño del área de la imagen también cambia con la distancia a la apertura del colimador. Si la apertura de detector es D y el factor de magnificación es I/O , tenemos:

$$(3) \quad D' = \frac{D}{I/O}$$

En la figura 2.9 podemos ver un ejemplo de captación de imagen utilizando colimador pinhole ya que se utilizan principalmente para la obtención de imágenes magnificadas de pequeños órganos y para estudios con animales pequeños.

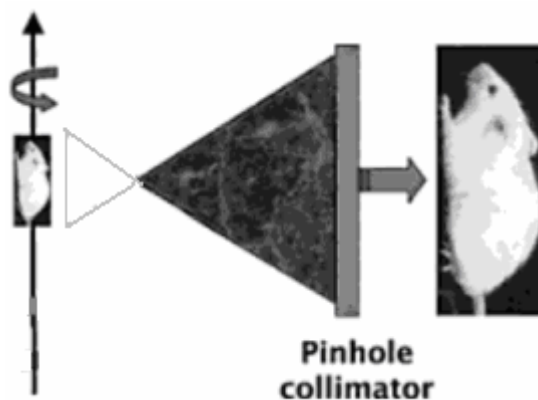


Fig 2.9 .- Geometría de adquisición utilizando un colimador pinhole

El **colimador parallel-hole** (figura 2.10) es el más utilizado en la práctica clínica. Consiste en una pieza de material de alta densidad con aperturas paralelas que se realizan taladrando el material del colimador, mediante moldes o dando forma a papel de plomo. A las paredes que separan las aperturas se les denomina septa. La anchura de estas paredes debe ser suficiente para evitar que los rayos crucen de un agujero al siguiente. El colimador parallel-hole proyecta una imagen del mismo tamaño que la fuente sobre el detector.

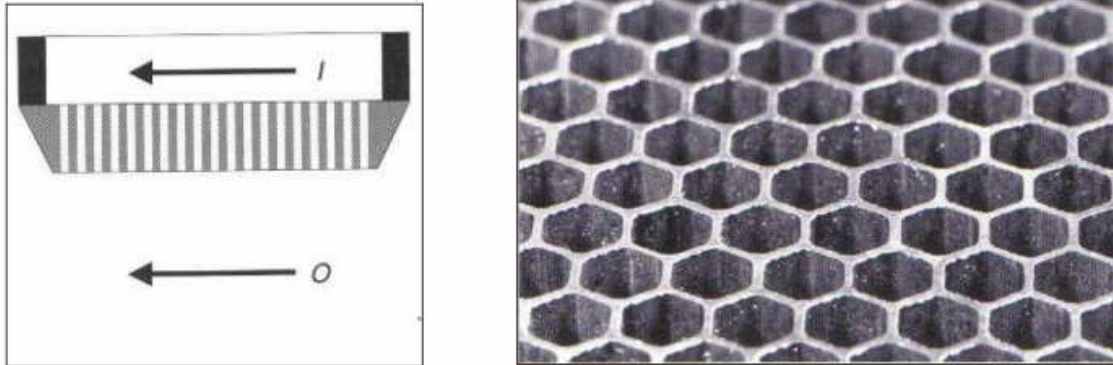


Fig 2.10.- Colimador parallel-hole

Mecanismo de centelleo

El proceso de centelleo implica la conversión de fotones de alta energía en luz visible mediante la interacción de los fotones de alta energía con el material centellador.

De forma más específica, un material centellador, debería poseer las siguientes características:

- Debe convertir la energía de las partículas cargadas en luz detectable con una alta eficiencia.
- Esta conversión debe ser lineal, el rendimiento lumínico debe ser proporcional a la energía depositada en un rango de energías lo más amplio posible.
- El material debe ser transparente a la longitud de onda de la emisión de luz, para poder obtener una buena eficacia en la recolección de la misma.
- El tiempo de decaimiento de la luminiscencia inducida debe ser lo menor posible, para poder obtener a partir de la luz generada señales lo más rápidas posible.
- El material debe poseer cualidades ópticas adecuadas y poder ser producido en las dimensiones correctas para ser usado en un bloque detector.
- El índice de refracción del material debe ser cercano al del cristal del PMT (en torno a 1.5), para permitir un acoplamiento adecuado entre la luz generada y un tubo fotomultiplicador.

2.3.2.3 Fotomultiplicadores

Los tubos fotomultiplicadores son elementos capaces de generar señales eléctricas en respuesta a la luz incidente, amplificándolas después mediante la emisión de electrones secundarios hasta niveles utilizables. La figura 2.11 muestra esquemáticamente sus elementos fundamentales:[7]

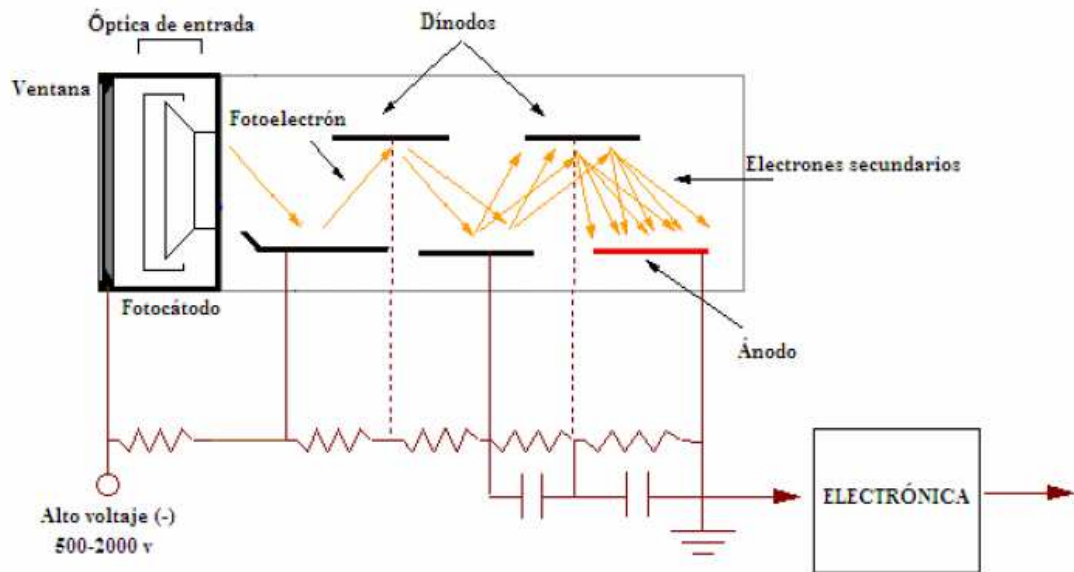


Fig 2.11.- Fotomultiplicadores

- Fotocátodo: Su cometido es el de convertir el flujo de luz incidente en un flujo de electrones.
- Sistema óptico de entrada: Para enfocar y acelerar el flujo de electrones.
- Multiplicador de electrones: Consistente en una serie de electrodos de emisión secundaria, denominados dinodos.
- Ánodo: Capta el flujo de electrones del multiplicador y proporciona la señal de salida.

2.3.3 Interacción entre los fotones gamma y el material centellador

Como hemos mencionado anteriormente el proceso de centelleo implica la conversión de fotones de alta energía en luz visible mediante la interacción con un material centellador. En los detectores usados en SPECT, este material centellador está acoplado ópticamente con un tubo fotomultiplicador que genera una señal eléctrica en respuesta a la luz incidente. Sin embargo existen una serie de implicaciones, derivadas del uso de una u otra configuración de los bloques detectores y de la propia naturaleza de los procesos físicos implicados, que harán necesario un filtrado de los eventos detectados durante un estudio.

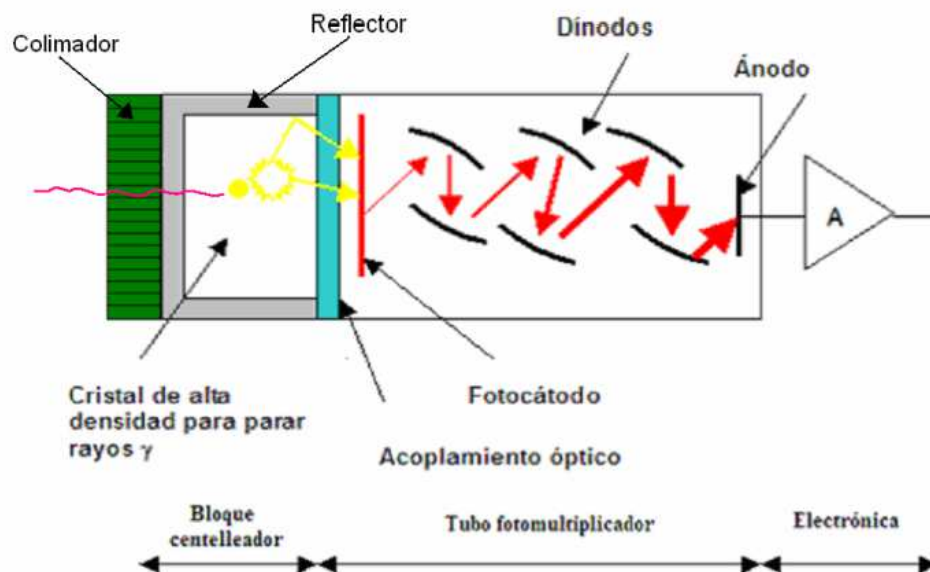


Fig 2.12.- Esquema de interacción de un solo fotón en un detector básico

Analizando el proceso para un único cristal de centelleo acoplado a la superficie de un fotomultiplicador como el mostrado en la figura:

- Un fotón incidente en el centellador interactuará, ya sea mediante dispersión Compton o absorción fotoeléctrica, generando una distribución de pares electrón hueco en la estructura del cristal.
- Los electrones liberados pasarán a recombinarse con las impurezas activadoras del cristal, dando lugar a estados excitados de las mismas.
- Los activadores en estados excitados vuelven a su estado original, dando lugar a la emisión de luz.
- La luz es captada por el fotomultiplicador que genera a su salida las señales oportunas, que a su vez son acondicionadas por un circuito electrónico.
- La amplitud de estas señales se digitaliza para leer en una computadora la energía depositada en cada interacción (equivalente a la amplitud de la señal de salida) y la posición de interacción de los fotones sobre la superficie del detector (se puede obtener de varias formas [6]) para la composición de una imagen.

Resolución de energía

La resolución de energía caracteriza al detector en referencia su capacidad para distinguir fotones de energías diferentes. La distribución típica de energía que podría esperarse encontrar para los electrones implicados en interacciones con fotones de 140 KeV es la mostrada en la figura 2.13:

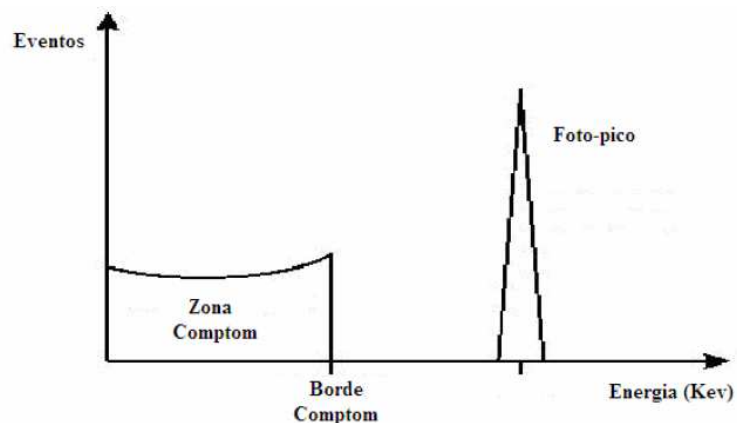


Fig 2.13 .- Características de una distribución de energía típica medida para un sistema de detección expuesto a fotones de 140 KeV.

La distribución de energía se distorsiona en la práctica debido a tres factores fundamentales:

1. Resolución de energía finita del sistema detector: La resolución de energía del bloque detector se define como la relación de anchura a mitad del máximo (full- width at half maximum, FWHM) del pico de mayor energía entre el valor de la energía en el pico de máxima energía (ver figura 2.14).
2. La radiación incidente no es realmente mono-energética, ya que una parte de los fotones habrán experimentado dispersión Compton antes de su detección.
3. Habrá eventos con energía mayor que el pico de mayor energía, debido a interacciones entre dos fotones con el detector que ocurran suficientemente juntas en el tiempo tal que no puedan resolverse como eventos separados y otros efectos estadísticos.

Con todo lo expuesto anteriormente y tendiendo presente que en cristales más pequeños, los fotones se pueden escapar después de transferir sólo parte de su energía la distribución de energía medida se asemeja más a la mostrada en la figura 2.14.

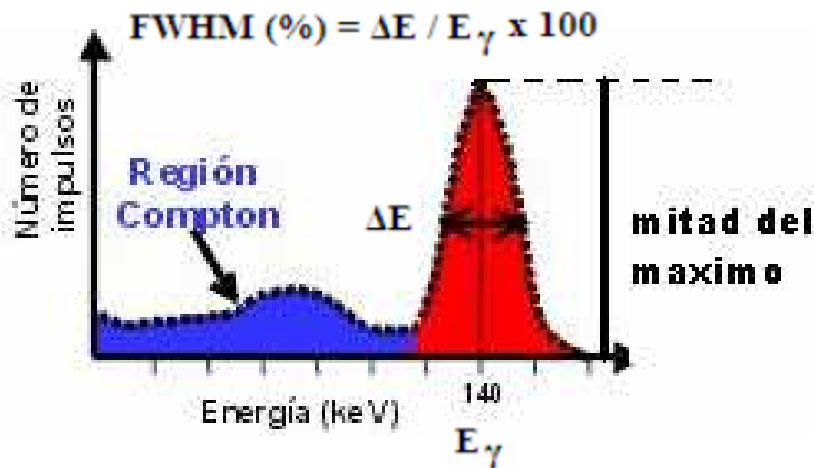


Fig 2.14.- Distribución de energía característica, medida para un sistema de detección expuesto a fotones de energía E y ejemplo del cálculo de la resolución de energía del detector obtenida como el FWHM en %.

Si se registra una gran proporción de fotones incidentes en el pico de mayor energía y la resolución de energía del sistema detector es buena, entonces es posible discriminar fotones que interactuaron mediante efecto fotoeléctrico de fotones que interactuaron mediante dispersión Compton simplemente eliminando aquellos eventos que tienen baja energía. La proporción de eventos en el pico de mayor energía se incrementa con el tamaño del detector. Sin embargo, los detectores grandes reducen la resolución espacial del sistema.

Campos de visión

El campo de visión es el área activa de nuestro detector, a su vez cabe distinguir ciertas afecciones :

FOV.- Field of view, campo de visión que representa la superficie total del detector.

UFOV.- Useful field of view, campo de visión útil que representa el 90% la zona de la superficie total del detector.

CFOV.- Central field of view, campo de visión central que representa el 80% de la zona de la superficie total del detector.

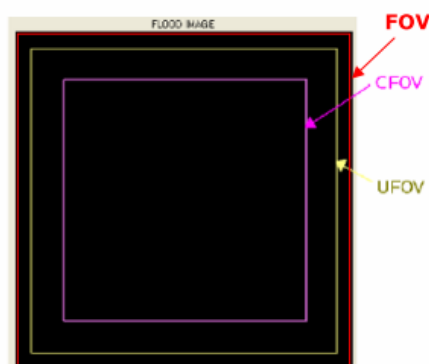


Fig 2.15 .- FOV, UFOV, CFOV

2.3.4 SPECT

2.3.4.1 Adquisición SPECT

Una gamma cámara, montada sobre un anillo giratorio, es suficiente para adquirir los datos necesarios para la obtención imágenes tomográficas (3 dimensiones). La gamma cámara adquiere imágenes bidimensionales en intervalos angulares equiespaciados alrededor del paciente. Cada una de estas imágenes constituyen lo que se denomina una proyección. A partir de un cierto número de estas proyecciones y utilizando las técnicas de reconstrucción adecuadas es posible reconstruir el volumen del sujeto con información sobre la distribución del compuesto inyectado en el organismo.

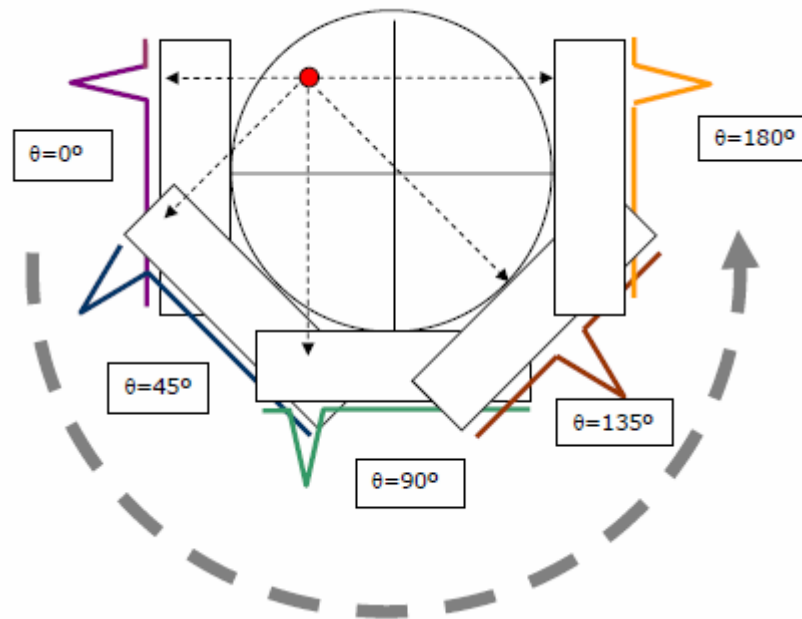


Fig 2.16 .- Adquisición de imagen en distintas posiciones angulares

La figura 2.16 ilustra los principios básicos de la formación de la imagen con la gamma cámara, combinando las imágenes 2D o proyecciones del paciente obtenidas en diferentes posiciones angulares, obtenemos imágenes 3 o 4D con información sobre la distribución del compuesto inyectado en el organismo.

2.3.4.2.- Algoritmos de reconstrucción

Como hemos mencionado las imágenes adquiridas desde diferentes puntos de vista a partir de una cámara es lo que se conoce como proyección. El procesamiento para poner las proyecciones en conjunto y obtener la imagen final de un paciente se conoce como reconstrucción de la imagen.

La reconstrucción tomográfica utiliza básicamente dos técnicas:

- algoritmos analíticos
- algoritmos iterativos.

Algoritmos analíticos

Las técnicas analíticas se pueden considerar, matemáticamente, como diferentes aproximaciones para obtener una transformación inversa, que permite recobrar una imagen a partir de sus proyecciones. En general, se basan en el conocido algoritmo de retroproyección filtrada

Retroproyección filtrada

Una primera aproximación de la distribución de la fuente se obtiene al proyectar los datos hacia atrás sobre la rejilla de la imagen entera. Esto es lo que se conoce como retroproyección. Si se suman las retroproyecciones de todos los puntos se obtiene la distribución total de la imagen.

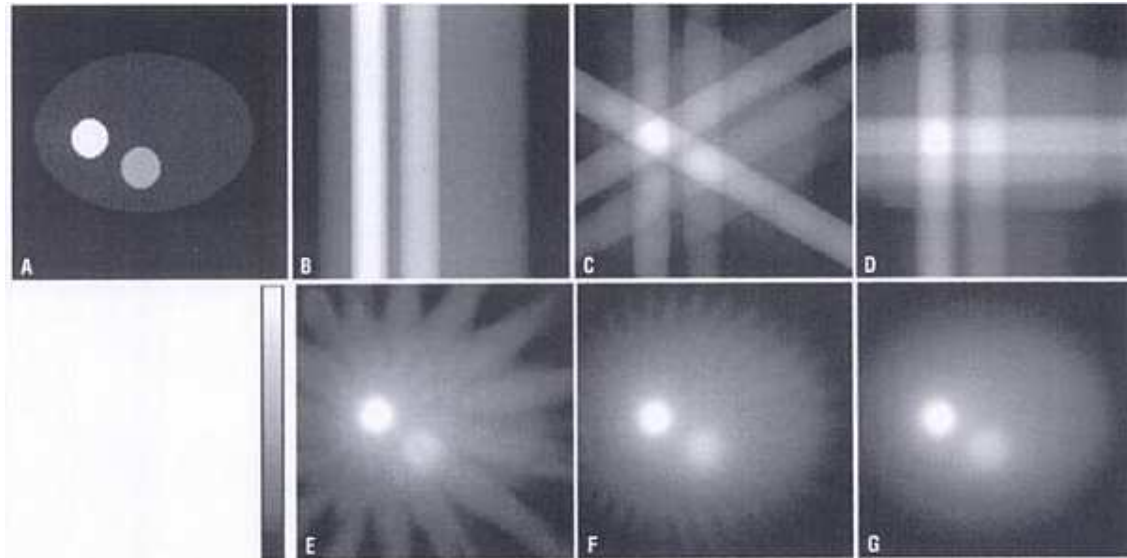


Fig 2.17.- Reconstrucción por retroproyección

En la figura 2.17 podemos ver la creación de una imagen a través de proyecciones. La imagen A muestra el objeto original utilizado para crear proyecciones y las siguientes imágenes B-G muestran los resultados de utilizar 1, 3, 4, 16, 32 proyecciones, respectivamente, todas distribuidas de manera uniforme sobre los 360° del objeto, obtenidas por el algoritmo de reconstrucción. Estas imágenes muestran el artefacto estrella que se producen en los dos círculos de la imagen original, efecto debido al procedimiento matemático necesario para generar la retroproyección y que se va disipando a medida que se añaden más proyecciones al algoritmo.

Algoritmos iterativos

Un método iterativo de reconstrucción estadística tiene dos componentes esenciales: un modelo estadístico del sistema, que puede incorporar más o menos detalles del mismo, y un algoritmo de tipo EM que conduce el proceso de iteración mediante el cual se recalcula el objeto "más probable" que daría lugar al conjunto de datos (proyecciones) observado.

Durante el proceso se calculan las proyecciones que produciría una determinada distribución de trazador incorporando normalmente la geometría del sistema, la sensibilidad de cada pareja de cristales, el ancho de cada línea de respuesta, y diversos factores de interés. Es posible incluso incorporar información sobre la física subyacente al proceso de adquisición (rango del positrón, tipo de colimador utilizado, tamaño de los cristales de los detectores).

Al igual que en el caso de los algoritmos analíticos, los métodos iterativos pueden ser en dos o tres dimensiones [21] y de forma análoga, para el caso 2D es necesario pasar por un proceso de reformato inicial, hecho que limita la calidad máxima que se puede conseguir respecto a la alcanzable por un método 3D. La contrapartida de estos métodos iterativos es su alto coste computacional que obliga a largos tiempos de cálculo o, alternatively, al uso de algún sistema de computación paralela. Aunque también hay varios algoritmos iterativos disponibles para equipos de uso humano, este tipo de reconstrucción resulta de mucho mayor interés para imagen animal, donde es crítica la necesidad de mejorar todo lo posible la resolución espacial.

Para ayudar a valorar los datos de los fabricantes respecto a la disponibilidad de métodos avanzados de reconstrucción es necesario destacar algunos aspectos. En lo referente a métodos analíticos, prácticamente todos los equipos ofrecen el conjunto completo de posibilidades 2D y 3D sin grandes diferencias, salvo en lo que puede referirse a la fidelidad cuantitativa de los algoritmos, difícil de valorar y sobre la que raramente se ofrece información. Respecto a los métodos iterativos, su uso está cada vez más extendido y la oferta abarca múltiples modos de implementación. Sin embargo, el elemento crítico que más distingue unos de otros no es tanto el tipo de algoritmo iterativo utilizado (EM, OSEM, MAP, etc.) sino la calidad del modelo del sistema, el conjunto de parámetros que incorpora, y la eficiencia con la que se almacenan y manejan los datos. Este conjunto de factores es el que determina en gran medida la calidad de imagen alcanzada y el tiempo de reconstrucción necesario.[3]

2.3.4.3 Correcciones y calibración en sistema SPECT

No linealidad

Un problema básico que surge en el detector y en la electrónica, es la no linealidad de la imagen. Los objetos en línea recta aparecen como líneas curvas en la imagen. Si la curva es hacia el interior este efecto se denomina distorsión de cojín (*pincushion distortion*) y si es hacia el exterior distorsión de barril (*barrel distortion*) como se ve en la figura 2.21

Las no linealidades se dan cuando las señales de posición X e Y no cambian linealmente con la distancia de desplazamiento de una fuente radioactiva a través de la superficie del detector. Diferencias en la sensibilidad de los tubos FM, las no uniformidades de las guías de luz ópticas, así como un mal funcionamiento del tubo FM o de la electrónica, también pueden ser causa de no linealidad.

Por ejemplo, cuando una fuente se mueve de un borde a otro de un tubo FM pasando por el centro, la eficiencia de recogida de luz aumenta más rápidamente que la distancia que se mueve la fuente. Esto causa que la imagen de una línea que cruza un tubo FM este curvada hacia el centro de este. El resultado es una *pincushion distortion* característica en las áreas de la imagen que se encuentran cerca del centro del tubo FM, y una *barrel distortion* entre ellas.

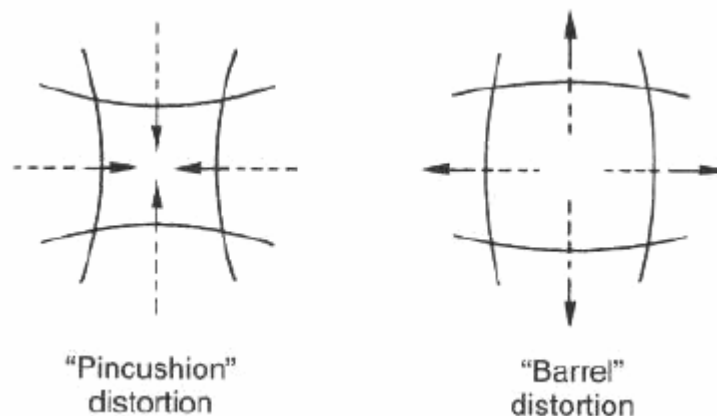


Fig 2.18.- No linealidad en la imagen

No uniformidad

En un sistema detector para tomografía por emisión de rayos gamma los elementos detectores deben proporcionar información al menos semi-cuantitativa sobre los eventos detectados.

Al exponer el detector a un flujo de radiación uniforme, obtendremos una imagen de llenado de campo en la que se podrá apreciar una pequeña, pero notable no uniformidad en la intensidad. Una imagen que demuestra esta no uniformidad puede verse en la figura 2.19 (izqda.) y su aspecto tras corregir este efecto (drcha).

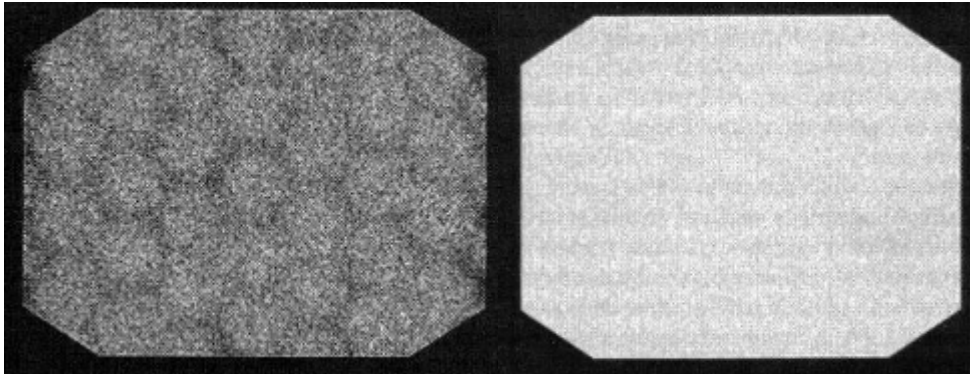


Fig 2.19.- (izq) imagen no uniforme, (drch) imagen uniforme

Existen dos causantes principales de la no uniformidad en la cámara:

- La primera es la no uniformidad en la eficiencia de detección, producida por las pequeñas diferencias de ganancia de los tubos FM, y la dependencia posicional de la eficiencia de recogida de luz.
- La segunda causa es la no linealidad de la imagen descrita anteriormente. En áreas de *pincushion distortion* los eventos son desplazados hacia el centro, causando un aparente punto caliente, mientras que en las áreas de *barrel distortion* los eventos son empujados hacia el exterior, causando un aparente punto frío. Debido a que la *pincushion distortion* característica ocurre cerca del centro de los tubos FM, es común ver un patrón de puntos calientes en la posición de los tubos FM en vez de una imagen uniforme [6].

Alineamientos de los espectros de energía

La diferencia de ganancia en la superficie del detector y la no uniformidad en los cristales afectan en la resolución de energía causando desplazamientos y/o alteraciones de la posición del fotopico (máximo del espectro de energía) de cada cristal con respecto a la posición esperada (por ejemplo 140 KeV para el caso del Tecnecio 99).

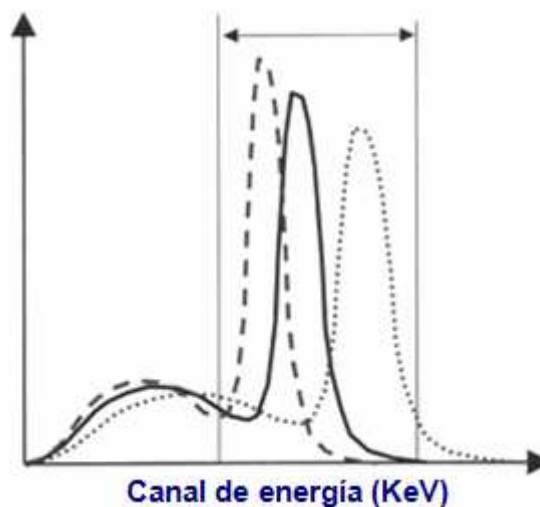


Fig 2.20 .- Alineamiento de los espectros de energía

Fundamentalmente se obtienen dos ventajas tras corregir este efecto. La primera es que el fotopico del conjunto se hace más estrecho, mejorando la eficiencia de detección de los fotones no dispersados dentro de la ventana energética seleccionada, esto incrementa el número de eventos válidos registrados, mejorando la calidad estadística de la imagen. La segunda es que los rayos γ dispersados con grandes ángulos son rechazados más eficientemente. De esta manera el contraste de la imagen mejora.

Centro rotación (COR)

Una prueba específica de los sistemas SPECT es la medida del alineamiento del sistema. Es de una importancia crítica que el centro mecánico de rotación coincida con el centro de rotación (COR) definido para las proyecciones que se emplean en la reconstrucción. Si la cámara se hunde o se tambalea a medida que gira alrededor del paciente, se introducirán en la imagen artefactos de emborronamiento o anillos adicionales. La mayor parte de fabricantes miden el alineamiento de sus sistemas antes de la entrega e incorporan un software que corrige proyección a proyección cualquier pequeña desviación del COR. Para sistemas con múltiples cabezas detectoras, un requisito adicional es que todas las cabezas deben estar alineadas con precisión en la dirección axial. De lo contrario, cada cabeza adquirirá datos de rodajas diferentes, lo que conducirá a un emborronamiento o a la aparición de artefactos en la dirección axial.

Los errores de alineamiento se pueden medir mediante la adquisición de perfiles desde distintos ángulos de una fuente puntual situada fuera del centro del FOV del sistema. Un protocolo típico implica la adquisición de un número par de perfiles N equiespaciados angularmente en un barrido de 360 grados tal y como se describe en [19].

2.4 ESTADO DEL ARTE

Hoy en día existen varios fabricantes de máquinas SPECT, cuyo objetivo general es obtener muy buena resolución espacial y sensibilidad. A continuación se redacta una breve descripción de las máquinas SPECT comerciales disponibles:

- En la actualidad, el sistema SPECT que posee mejores prestaciones (resolución espacial frente a sensibilidad) para imagen de pequeño animales es el **uSPECT-II** de la empresa MILabs (www.milabs.com, Utrecht, Holanda). El sistema de detección de este aparato está compuesto de tres detectores de elevada área activa colocadas en triángulo para posibilitar la adquisición de conjuntos de datos completos de forma estacionaria. La cama cuenta con etapas para su desplazamiento en las 3 dimensiones. Este sistema ha sido pionero en la utilización de lo que se denomina colimación multi-pinhole [15], técnica que permite obtener elevada sensibilidad y resolución espacial submilimétrica.

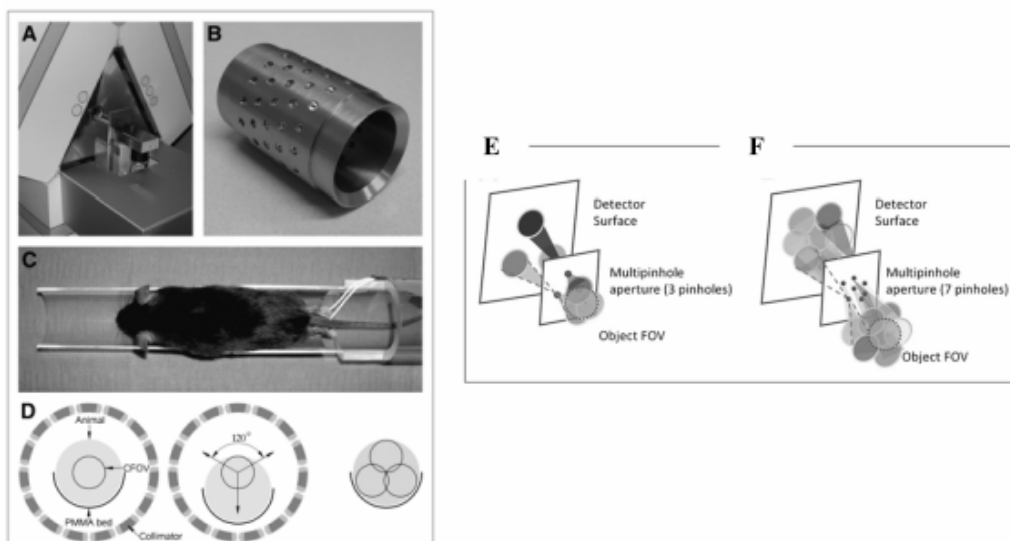


Fig 2.21 . A) Vista general del sistema uSPECT II de la empresa Milabs. B) Colimador de Tungsteno con 75 pinholes. C) Cama en donde se coloca el animal D) Sección del colimador, el círculo central (CFOV) representa el campo de visión. E) Esquema de sistema multipinhole en el que las proyecciones se solapan en el detector.

- El **NanoSPECT** de la empresa BioScan (www.bioscan.com), actualmente también distribuido por Philips (<http://www.medical.philips.com>), es por otra parte quizás el equipo más completo y versátil del mercado. Este sistema consta de uno, dos o cuatro detectores de elevada área activa. Existen varias configuraciones que incluyen también el uso de colimación multipinhole y diferentes protocolos de adquisición que permiten adaptar el equipo para su uso en gran cantidad de situaciones, incluyendo la posibilidad de escanear animales de tamaño medio como conejos o pequeños primates. Una de las características que diferencian este equipo del resto es que, configurado con colimadores multipinhole, las proyecciones de las diferentes aperturas se solapan en la superficie del detector, obteniendo así mejores valores de sensibilidad que otras implementaciones (Figura 2.21 E y F).
- El **X-SPECT** de Gamma Medica-Ideas (www.gm-ideas.com), actualmente distribuido por General Electric (<https://www2.gehealthcare.com>), es un sistema con una filosofía similar al anterior. Su diseño está basado en un número variable de detectores (entre uno y cuatro) montados en un soporte rotatorio. Los detectores de la versión comercial actual están realizados a partir de material semiconductor (CZT) y son por tanto capaces de proporcionar mejor resolución de energía que los dos equipos anteriores. A su vez, estos detectores también pueden ser equipados con un amplio rango de colimadores paralelos, pinhole o multipinhole para adaptar el equipo a las necesidades de cada estudio.
- El sistema **eXplore speCZT** de GE consiste en un anillo completo de detectores de CZT. Este escáner se puede equipar con colimadores multipinhole y colimadores de tipo slit (aproximación híbrida entre el colimador pinhole y el paralelo [4], cuya principal ventaja teórica es que permite aplicar magnificación sin que el campo de visión axial se vea reducido.
- Por último, cabe destacar el sistema **YAP-(S)PET** [5], desarrollado en la universidad de Ferrara y distribuido comercialmente por la empresa I.S.E. (<http://www.ise-srl.com/YAPPET/yap-doc.htm>). Se trata de un sistema PET/SPECT consistente en cuatro detectores de reducida área activa (4 x 4 cm). Para funcionar como SPECT, éste sistema dispone de colimadores de agujeros paralelos especialmente diseñados que, aunque quedan lejos de proporcionar características similares a los de los equipos anteriores, permiten la realización de gran cantidad de estudios comunes con animales. La ventaja fundamental de este equipo, es que su precio (o al menos el de sus componentes) es mucho menor que el de los otros sistemas comentados debido al empleo de mucho menos material detector.

El sistema SPECT desarrollado en el laboratorio LIM, llamado FSPECT, consta de dos detectores. Este sistema está pensado para reducir el coste del producto obteniendo un rendimiento razonable.

Aunque la comparación entre los equipos SPECT comerciales comentados en ese documento es muy difícil debido a las diferentes aproximaciones utilizadas para su implementación. En la Tabla 1 se han incluido algunas de sus características fundamentales. Dado que a su vez el modo de medida de las características de las diferentes máquinas es bastante heterogéneo, la tabla incluye referencias a las publicaciones y/o fuentes de donde se obtuvieron los datos. [3]

Tabla1. Sistemas comerciales SPECT para animales de laboratorio

	uSPECT II	nanoSPECT	SPECZT	X-SPECT	YAP-(S)PET
Características comunes					
Colimadores intercambiables	Si	Si	Si	Si	No
Actualizable CT	Si	Si	Si	Si	No*
Animales tamaño medio	No	Si	No	Si	No
Multicapa	Steps	Helicoidal	Helicoidal	Helicoidal	Secuencial
Gating	Si	Si	Si	No	No
Imagen multi-isótopo	Si	Si	Si	Si	No
Detectores					
Material	Nal (Ti)	Nal (Ti)	CZT	CZT	YAP: Ce
Nº detectores**	3	1-2 ó 4	10	1 a 4	2 ó 4
Área activa por detector (largo x ancho x grosor)	508 x 381 x 9.5 mm ³	230 x 215 x 6.4 mm ³	80 x 80 x 5 mm ³	N/A	40 x 40 x 25 mm ³
Tamaño detectores	Monocrystal	1 x 1 x 6.4 mm ³	2.46 x 2.46 x 5 mm ³	N/A	2 x 2 x 25 mm ³
Volumen detector total	5516.1 cm ³	1265.92 cm ³	320 cm ³	N/A	160 cm ³
Fotodetectores	PMTs	PMTs	--	N/A	PS-PMT
Nº fotodetectores x detector	55	33	--	N/A	1
Rango energía	25-400 keV	25-365 keV	25-250 keV	25-250 keV	50-850 keV
Resolución energía (^{99m} Tc)	< 10 %	9.7 %	7 %	< 7 %	24 %
Resolución intrínseca	≈ 4-6 mm	≈ 2-2.5 mm	≈ 2.5 mm	N/A	≈ 2 mm
Mejor rendimiento en configuraciones estándar para rata/ratón					
Tipo colimador	Multipinhole rata / ratón	Multipinhole rata / ratón	Multislit rata/ Multipinhole ratón	N / A	Paralelo / Paralelo
Características colimador	75 aperturas 1 mm / 75 aperturas 0.6 mm	36 aperturas 1.5 mm x detector / 36 aperturas 1.0 mm x detector	5 slits / 7 pinholes 1 mm diámetro	N/A	Agujeros 0.6 mm, septa 0.15, longitud N/A / "
FOV estático	27 x 11 mm ² / 12 x 7 mm ²	62 x 24 mm ² / 30 x 16 mm ²	76 x 80 mm ² / 32 x 30 mm ²	N/A	40 x 40 mm ² / 40 x 40 mm ²
FOV axial multicapa	250 mm (Steps)	270 mm (Helicoidal)	250 mm (Helicoidal)	250 mm (Helicoidal)	N / A
Movimientos x FOV	Mínimo 3 steps cama	Mínimo 4 steps gantry	Mínimo 1 rot. Colimador	N/A	Mínimo 1 rot. Gantry
Resolución transaxial (^{99m} Tc)	0.8 mm / 0.45 mm	< 1.2 mm / < 0.75 mm	< 1.7 mm / < 1 mm	N/A	3 mm / 3 mm
Resolución axial (^{99m} Tc)	0.8 mm / 0.45 mm	< 1.2 mm / < 0.75 mm	3.1 mm / < 1 mm	N/A	3 mm / 3 mm
Sensibilidad de pico (^{99m} Tc)	700 cps/MBq / 1500 cps/MBq	1200 cps/MBq / 1000 cps/MBq	> 225 cps/MBq / > 400 cps/MBq	N/A	30 cps/MBq / 30 cps/MBq
Fuente Bibliográfica					
Fuente	(van der Have et al., 2009)	Documentación Técnica facilitada por Philips	Documentación Técnica facilitada por GE	N/A	(Del Guerra et al., 2006)

* Aunque no se vende como PET/SPECT/CT la cama es compatible con el sistema micro-CT 1076 de skyScan (<http://www.skyscan.be/home.htm>). [3]

3 SISTEMA FSPECT

El presente proyecto consiste en la implementación de la consola de calibración del sistema, es decir la herramienta software que el usuario utilizará para calibrar el sistema. Los siguientes apartados explican brevemente cada una de las partes que conforman el sistema FSPECT para proporcionar al lector una visión general de la relación entre la herramienta implementada y los restantes elementos de la máquina.

3.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El prototipo de tomógrafo FSPECT se compone básicamente de dos gamma cámaras montadas en un soporte rotatorio, que transmiten información digitalizada directamente a un ordenador de control a través de una tarjeta de adquisición de datos [14].

A continuación se muestra un esquema gráfico de los elementos que componen el sistema FSPECT. Los apartados subsecuentes, describen brevemente cada una de las partes constituyentes.

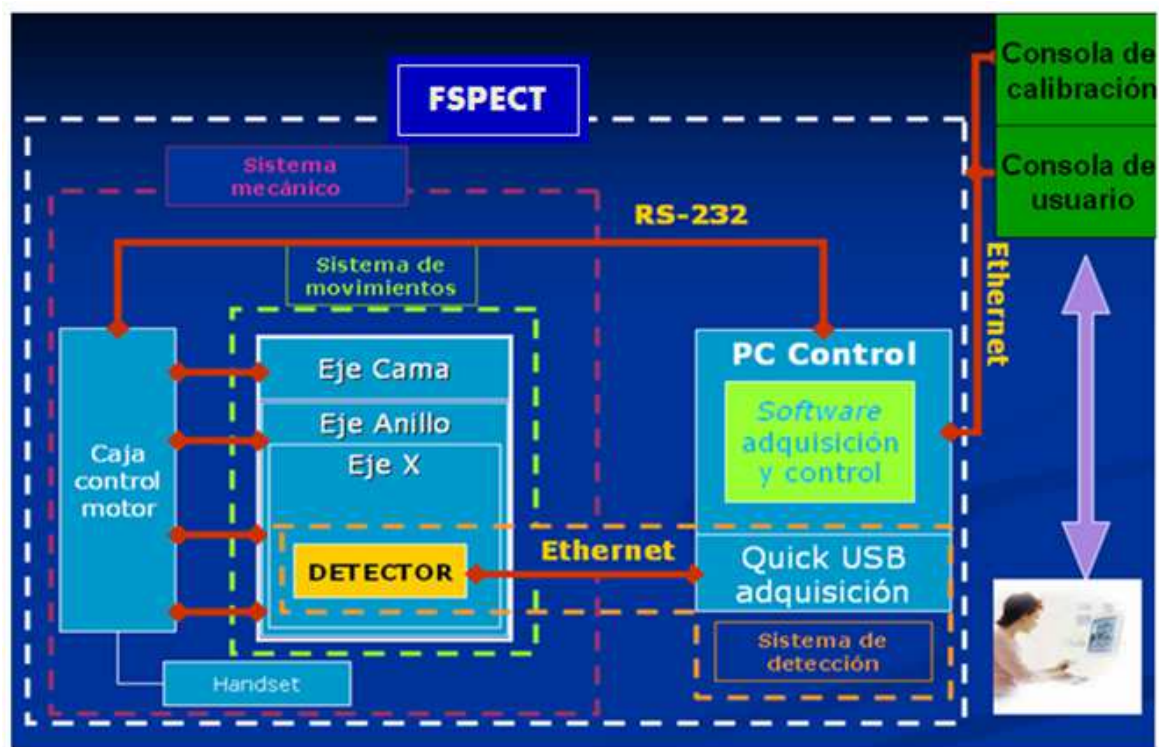


Fig 3.1.- Diagrama de bloques del sistema FSPECT

3.2 SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico consta de las siguientes partes:

- **Hardware de control de movimientos.-** Formado por una caja de control de motores que hace de interfaz entre el sistema de movimientos y un PC de control.



Fig 3.2.- Caja controladora de motores

El sistema de movimientos está compuesto por un soporte donde se alojan varios ejes de movimiento motorizados.

- Cama (Figura 3.4).- Es el elemento mecánico que permite la realización de movimientos en la dirección axial del tomógrafo mediante un motor paso a paso y movimientos en el eje transaxial mediante un actuador manual. Los movimientos en el eje axial, se controlan mediante el PC de control o mediante un *handset* con dos botones (adelante o atrás). El usuario puede colocar en este eje camas de diferente tamaño diseñadas para estudios con ratón, rata, o de calibración.
- Anillo rotatorio (Figuras 3.3 y 3.4).- En este elemento están alojados los detectores. Su cometido es el de mover los detectores alrededor del eje axial. Se mueve también mediante un motor paso a paso.
- Movimientos del detector en el eje x (transaxial, Figura 3.3).- Estos elementos se encuentra situado sobre el anillo. Cada cámara esta montada en uno de estos ejes cuyo cometido es acercar o alejar los detectores al sujeto bajo estudio. También funcionan mediante motores paso a paso que se gestionan desde el software de adquisición.

El siguiente esquema muestra la colocación espacial de los detectores y el sistema de referencia adoptado en este desarrollo.

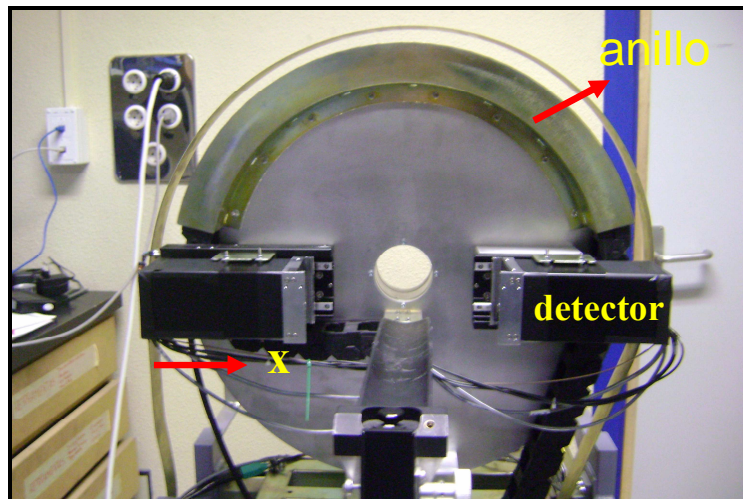


Fig 3.3.- Vista frontal y coordenadas de FSPECT

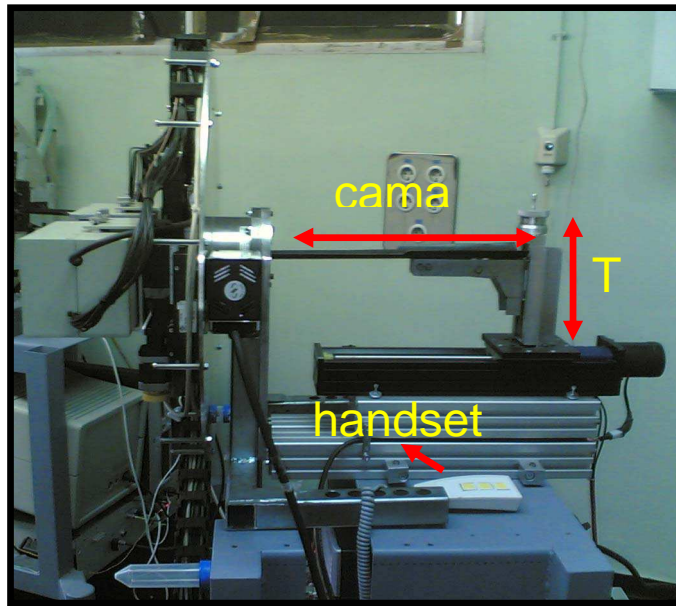


Fig 3.4 .- Vista posterior de la máquina FSPECT

3.2.1 Correcciones asociadas al sistema mecánico

Debido a una serie de errores derivados de la tolerancia en la fabricación de la mecánica, existen una serie de características que es común corregir por software en este tipo de sistemas.

Alineamientos y centros de rotación

En sistemas tomográficos rotatorios es imprescindible que el centro de rotación mecánico coincida con el centro de rotación (COR) definido para las proyecciones utilizadas en la reconstrucción. Si los detectores además se mueven durante su rotación (por ejemplo debido a una mala fijación mecánica), o si simplemente su posición no es la que el algoritmo de reconstrucción espera, las imágenes pueden sufrir un emborronamiento adicional o artefactos con forma de anillo. Por tanto es crucial para la obtención de imágenes libres de artefactos un alineamiento correcto del sistema de detección.

Para la configuración basada en colimadores pinhole en nuestro sistema, el procedimiento de corrección consiste en el cálculo de parámetros de alineamiento utilizando el método descrito en [13]. Este método requiere de la adquisición de un maniquí de calibración como el que muestra la figura 3.5.

Como material de partida, la aplicación desarrollada hace uso de dos programas desarrollados por colaboradores del proyecto denominados **PinholeCalibration.exe** y **MatrixGenerationPinhole.exe**. Estos programas se encargan de generar ficheros de salida con los parámetros de corrección para la geometría pinhole y una matriz que se utilizara en el algoritmo de reconstrucción para esta geometría que incluye los parámetros de alineamiento calculados..



Fig 3.5.- Maniquí utilizado para la calibración geométrica del aparato cuando este se equipa con colimadores pinhole

3.3 SISTEMA DE DETECCIÓN

Esta compuesto por 2 detectores de radiación sensibles a posición de tamaño reducido [14].

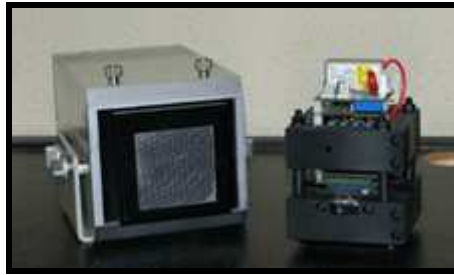


Fig 3.6 .- Elemento detector

Los elementos que forman el detector están ensamblados en una cubierta de *delrin* que salvaguarda su integridad y permite su ajuste en la carcasa principal de la gamma-cámara (Figura 3.6). Esta carcasa, además de contener el blindaje necesario para la correcta operación del detector y permitir su acoplamiento al soporte rotatorio de la máquina, incorpora un mecanismo manual que permite acoplar al detector dos tipos de colimador diferentes, uno de agujeros paralelos y otro de tipo pinhole con aperturas intercambiables (Figura 3.7). Los colimadores de agujeros paralelos se han fabricado en plomo y consisten en una matriz de agujeros hexagonales de 1 mm de apertura, 25 mm de longitud y un espesor septal de 0.2 mm.[14]



Fig 3.7.- Colimador de agujeros paralelos (izquierda) y colimador de tipo pinhole con aperturas intercambiables (derecha)

PC de control.- Es el equipo informático (S.O LINUX) encargado de albergar el software de adquisición y control del tomógrafo. A su vez, este equipo alberga el resto de programas que se utilizan para su la evaluación y configuración de ciertos aspectos de la máquina.



Fig 3.8 .- PC de control

Sistema de adquisición de datos.- Se encarga de detectar la interacción de fotones gamma con los detectores y en respuesta digitalizar las señales de los mismos que permitirán determinar las coordenadas de interacción y la energía depositada por cada fotón. A su vez, este sistema de adquisición de datos se encarga de enviar los datos digitalizados al PC de control, con información útil para la aplicación de otro conjunto de correcciones de bajo nivel. El sistema de adquisición FSPECT cuenta con 6 canales de conversión A/D por detector. En el presente documento llamaremos a estos canales X_a , X_b , Y_a , Y_b , ΔE , ΔT . X_a , X_b , Y_a e Y_b sirven para determinar las coordenadas de interacción X e Y del fotón sobre la superficie del detector y su energía, ΔE no se utiliza en esta máquina y ΔT proporciona información temporal precisa sobre el momento de la interacción.



Fig 3.9.- Sistema de adquisición de datos

3.3.1 Correcciones asociadas al sistema de adquisición

Los ADCs (convertidores analógico-digital) utilizados en la implementación de este sistema (ADCs integradores) requieren de un control de calidad específico, ya que debido a su principio de funcionamiento añaden un offset a la señal original que proviene del detector. Estos errores de offset denominados error de pedestal, se deben a que el nivel del canal de entrada no es cero aunque no haya señal de los detectores (debido al ruido). Por este hecho, integrar la señal de entrada durante un determinado intervalo temporal (ventana de integración), produce un valor distinto de cero proporcional a la duración de la ventana de integración.

Para corregir este error la aplicación desarrollada hace uso de un programa escrito en lenguaje C que se encarga de adquirir datos con los canales de entrada en vacío **[10]**, a partir de estos datos, que son procesados por la aplicación desarrollada, se obtienen los valores de corrección pertinentes.

Por otra parte, en el escáner FSPECT se ha introducido hardware específico que proporciona información sobre el instante de llegada de los eventos a los detectores. Estas marcas temporales o “timestamp” tienen 2 componentes uno grueso con precisión de 50 ns y otro fino con precisión de 150 ps

Timestamp grueso

Se usa una señal de reloj de 20 MHz de frecuencia que alimenta un contador. Cada vez que llega un evento, se lee el contador y se incluye esta información temporal con los demás datos asociados al evento. Este contador es de 28 bits, por tanto es capaz de contar en el rango de $0-2^{28} - 1$.

Timestamp fino o timeshift

Se utiliza un convertidor de tiempo a digital (TDC: Time-to-digital converter) también basado en convertidores AD integradores. Existe un TDC asociado a cada detector del sistema y todos los TDC usan como referencia la misma señal de reloj indicada anteriormente el timestamp grueso. Debido a la gran precisión de este elemento (150 ps), es necesario calibrar las diferencias en el instante de llegada de los flancos de esta señal de reloj a los diferentes detectores (existirán problemas debido a diferencias en la longitud de los cables (skew) y jitter), es decir, para el mismo instante de llegada de un evento a varios detectores, el valor obtenido en el timestamp de cada uno de los detectores no es el mismo debido a las diferencias de tiempo de propagación de las señales asociadas.

La aplicación desarrollada hace uso de un programa escrito en lenguaje C donde se realiza la adquisición de datos en modo timeshift **[10]**, para un número determinado de paquetes. Este modo consiste simplemente en mandar señales sincronizadas a todos los TDC del sistema para determinar cual es la medida que hace cada uno de ellos. Una vez obtenido el valor medio de la medida para cada TDC, se determinan las desviaciones entre ellos mediante la aplicación desarrollada en este proyecto.

Se explicarán con más detalle la calibración por pedestales y timeshift en el apartado 4.2 del presente documento

3.3.2 Correcciones asociadas a los elementos detectores.

Al exponer los detectores a una distribución de radiación uniforme mediante por ejemplo un maniquí de calibración por uniformidad [6], obtendremos una imagen de llenado de campo en la que se podrá apreciar una pequeña, pero notable no uniformidad en la intensidad (3.10 izq). Si el detector fuese ideal y se expusiese a este patrón de radiación, lo lógico sería obtener una distribución uniforme como la mostrada en la figura (3.10 drch). Dado que en sistemas SPECT se pretende obtener una imagen cuyas intensidades sean equivalentes a la cantidad de trazador depositada en el área de interés, es necesario realizar correcciones en los datos para evitar este problema denominado no-uniformidad.

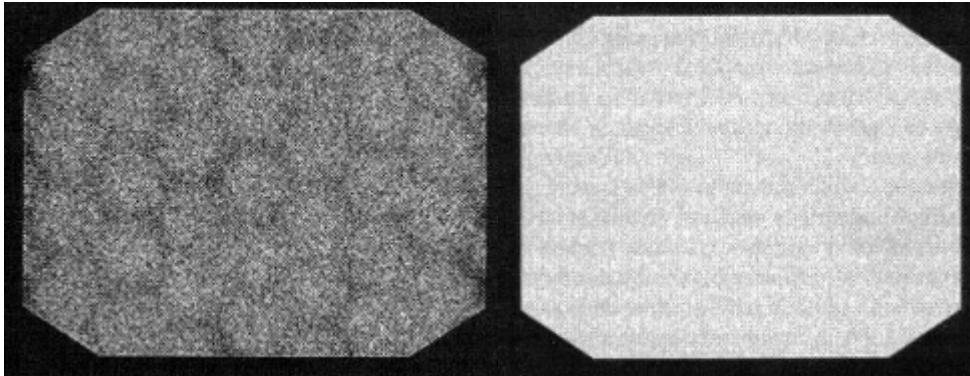


Fig 3.10.- (izq) imagen no uniforme, (drch) imagen uniforme

Las implementaciones de estas correcciones se basan en general en la adquisición sin colimador de una fuente con una concentración de actividad homogénea que provoca una irradiación uniforme del campo de visión. A partir de una imagen obtenida en esta situación, los factores de normalización se calculan como el ratio entre el número ideal de cuentas que debería obtenerse (valor medio por píxel en la imagen) y el número real de cuentas detectadas en cada píxel. Este tipo de corrección, necesita acumular un número de eventos suficiente como para evitar efectos estadísticos en todas los píxeles de la imagen [11].

La aplicación desarrollada separa esta corrección en dos pasos, corrección de alineamientos de picos de energía y corrección de uniformidad de ganancia. La corrección de picos de energía consiste en alinear el espectro de energía de cada uno de los elementos detectores de cada detector a una referencia conocida en unidades de energía (por ejemplo 140 KeV es la posición del fotopico para Tc99). Este alineamiento se realiza mediante un ajuste de escala y un desplazamiento. Una vez los espectros están escalados y alineados, se realiza una corrección de uniformidad de ganancia consistente en obtener factores de normalización que se calculan como el ratio entre el número ideal de cuentas que debería obtenerse (valor medio por píxel en la imagen) y el número real de cuentas detectadas en cada píxel. Al final de esta corrección, la aplicación desarrollada almacena los resultados en un fichero de corrección para posteriormente aplicarlo sobre las imágenes que se adquieran en la máquina de forma subsecuente.

3.4 INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario del sistema FSPECT es una herramienta versátil, diseñada para facilitar la interacción del usuario con los diferentes subsistemas del tomógrafo. Está permite llevar a cabo la calibración del aparato, la adquisición de estudios SPECT, y la reconstrucción de las imágenes correspondientes a los mismos.

A continuación se muestra un esquema gráfico de los bloques que conforman la interfaz de usuario

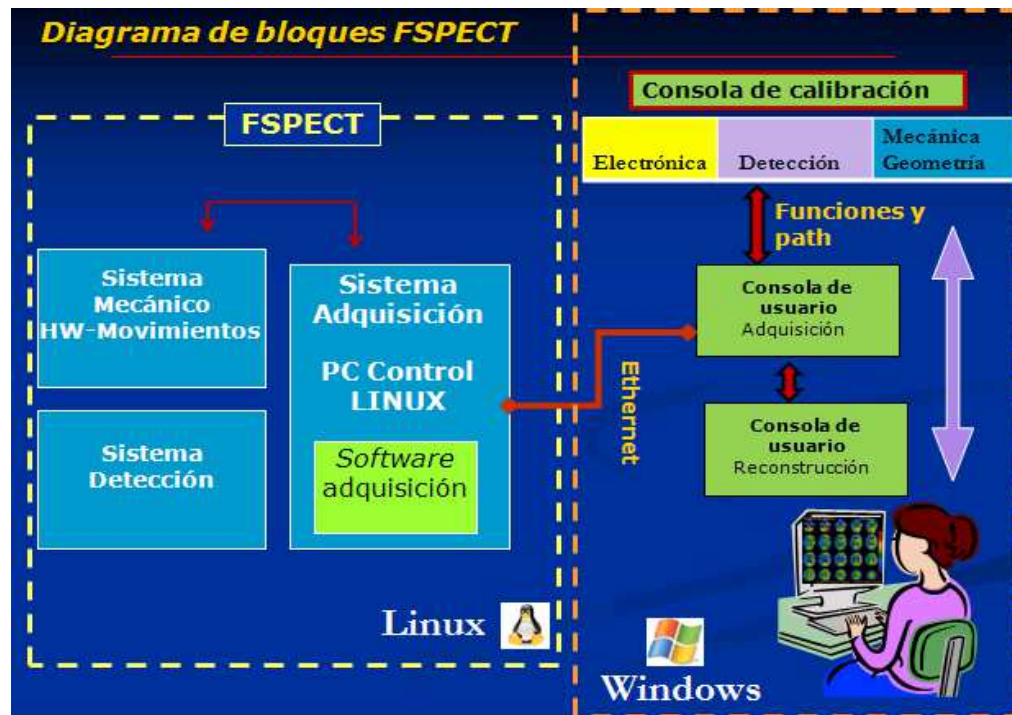


Fig 3.11.- Bloques de la interfaz de usuario

La consola de usuario ha sido implementada en el lenguaje de programación IDL (Interface Data Language) sobre la plataforma Windows. Desde aquí el usuario realiza las peticiones de adquisición de datos, reconstrucción de la imagen y calibración del aparato.

La consola de calibración desarrollada en este proyecto se ha integrado en la consola de usuario del aparato. Esta aplicación, se comunica con el software de adquisición ubicado en el ordenador de control del aparato mediante el protocolo ssh para la ejecución de programas y mediante ftp para la transferencia de datos.

La consola de calibración está configurada en tres bloques, cada uno dedicado a realizar una serie de correcciones específicas. Por una parte se realiza las correcciones asociadas al sistema de adquisición, seguido de las correcciones asociados a los elementos detectores y finalmente correcciones asociadas al sistema mecánico.

A continuación mostraremos la primera ventana de selección:



Fig 3.12.- Interfaz inicial del sistema FSPECT

Para más información sobre la adquisición y reconstrucción consultar [22].

4.- DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CALIBRACIÓN FSPECT

4.1 INTRODUCCIÓN

Debido a la existencia de diferentes equipos de detección de rayos gamma y a su utilización en la práctica clínica, ha sido necesaria la definición de protocolos experimentales estandarizados para medir el rendimiento de este tipo de equipos. Estos protocolos, cuyo objetivo es asegurar que los resultados que se obtendrán para un determinado paciente serán consistentes, han de ser fáciles de reproducir y no deberían requerir un equipamiento especializado. Tales protocolos pueden usarse además para comparar gamma cámaras o estudios realizados sobre un mismo paciente con diferentes equipos, realizar pruebas de rendimiento en cámaras recién instaladas, o como parte de control para asegurar que la cámara esta trabajando con los valores que especifica el fabricante.

Las guías de realización de las pruebas de calidad y su aceptación, varía en función del lugar en el que nos encontremos. Los protocolos que se presentan a continuación se basan principalmente en las recomendaciones de la NEMA (Nacional Electrical Manufacturers Association). Es importante que todas las medidas se realicen bajo las mismas condiciones con las que se realizan los estudios rutinarios.

En la aplicación desarrollada para el control de calidad del sistema FSPECT se han definido tres módulos de calibración:

- **ACQ-SYSTEM** es el primer modulo y en el se realizan las correcciones relacionadas con el sistema de adquisición en la que se corrigen los errores offset y timeshift anteriormente comentados (ver apartado del presente documento [3.3.1])
- **DETECTORS** es el segundo módulo y en el se realizan las correcciones asociadas a los elementos detectores: no uniformidad de la imagen y desalineamientos de los picos de energía. Al igual que el módulo anterior es necesario partir de una adquisición de datos que se realiza por medio del módulo de adquisición de la consola de usuario (ver apartado del presente documento [3.3.2])
- **GEOMETRY PINHOLE** es el tercer módulo en el que se realizan las correcciones asociadas al sistema mecánico, corrigiendo los desalineamientos entre detectores y los de los propios detectores con el centro de rotación COR del aparato. (ver apartado del presente documento [3.2.1])

4.2 ACQ SYSTEM

4.2.1 Explicación de las correcciones

Corrección de Pedestales

El sistema FSPECT consta de 2 detectores y 6 señales por detector, lo cual da lugar a un total de 12 señales a digitalizar para obtener la información de interés.

Como se ha mencionado en puntos anteriores los pedestales de un canal de conversión ADC basado en integradores de carga son los valores obtenidos del mismo cuando las entradas del canal están en vacío, es decir, el valor digitalizado que se obtiene mediante un ADC integrador cuando no existe señal a integrar en la entrada. Los valores de pedestal, introducen por tanto un error sistemático que deberemos corregir en las señales digitalizadas. Debido al esquema de digitalización utilizado (**gated integrators**) es necesario corregir los pedestales de cada uno de los 12 canales de conversión A/D (6 por cada detector). Para ello existe un software que recoge datos digitalizados de los ADC de forma periódica sin aplicar señales a sus entradas. Al realizar este procedimiento, en cada uno de los canales se digitalizará un valor que teóricamente debería ser 0 pero debido a la existencia de pedestales este valor es distinto de cero y dependerá del ancho de ventana de integración que estemos utilizando.

Para un canal cualquiera asociado a uno de los detectores y un ancho de ventana de integración fijo lo que obtendremos durante este proceso si hacemos un histograma de los valores obtenidos es lo que se muestra en la figura 4.1.

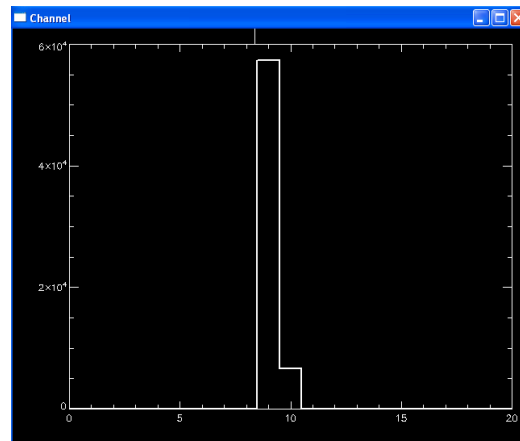


Fig 4.1.- Representación del valor de pedestal para un canal cualquiera

Si los canales tuviesen precisión infinita para la digitalización de las señales, el valor de pedestal que obtendríamos para cada canal sería una delta. No obstante y debido principalmente a la precisión del conversor A/D que estemos utilizando, tendremos que este valor de pedestal se distribuye en más de un canal (típicamente 2 para una ventana de integración del orden de 200 ns como la utilizada en la figura 4.1).

Para cuantificar este error adicional (que en todo caso debe ser muy pequeño) lo que hacemos para calcular la corrección, es ajustar el histograma obtenido para cada señal a una Gaussiana. La anchura a mitad de altura (FWHM) de dicha Gaussiana nos dará el error de cuantificación del canal. Y la posición de su máximo, el valor medio del error, que será la magnitud que deberemos restar a los datos digitalizados por ese canal en concreto para minimizar el efecto de este error.

En sumario, para realizar la corrección se computa la posición del máximo para cada uno de estos canales y su FWHM, guardando estos valores en un archivo de calibración.

Para considerar todos los canales como calibrados se deben cumplir 2 requisitos:

1. La posición de los máximos debe estar para todos los canales del sistema de adquisición dentro de tan solo 5 bins de cuantificación del ADC. Si alguno de los canales no cumple este criterio, supondremos que ese canal tiene algún problema a nivel de Hardware y se notificará al usuario, para que de parte al servicio técnico.
2. El FWHM de todos los canales debe ser menor que 2 bins de cuantificación del ADC. Si alguno de los canales no cumple este criterio, supondremos que ese canal tiene algún problema a nivel de Hardware e informaremos al usuario, para que de parte al servicio técnico.

Una vez obtenido el archivo de corrección el software de adquisición leerá este archivo y restará a los valores digitalizados en cada canal su valor de pedestal.

Corrección de Timeshifts

Para determinar el instante de llegada de cada uno de los eventos detectados, el sistema de adquisición de datos cuenta con una señal de reloj global y un convertidor de tiempo a digital (TDC: Time-to-digital converter) para cada detector. Estos TDC están basados en conversores AD integradores. Los TDC usan como referencia la misma señal de reloj global para su funcionamiento.

Cuando un evento se digitaliza, aparte de los datos de posición de interacción y energía, se envían a la computadora de control el valor de un contador que se incrementa con cada ciclo de la señal de reloj global (marca de tiempo gruesa) y el valor digitalizado en el TDC (marca de tiempo fina). Debido a la gran precisión de la marca de tiempo fina (150 ps), es necesario calibrar las diferencias en el instante de llegada de los flancos de esta señal de reloj a los diferentes detectores (existirán problemas debido a diferencias en la longitud de los cables (skew) y jitter) es decir, para el mismo instante de llegada de un evento a varios detectores, el valor obtenido en el timestamp o marca de tiempo de cada uno de los detectores no es el mismo debido a las diferencias de tiempo de propagación de las señales asociadas.

La aplicación desarrollada hace uso de un programa escrito en lenguaje C donde se realiza la adquisición de datos en modo timeshift **[10]**, para un número determinado de paquetes. Este modo consiste simplemente en mandar señales sincronizadas a todos los TDC del sistema exactamente en el mismo instante para determinar cual es la medida que hace cada uno de ellos. Una vez obtenido el valor medio de la medida para cada TDC. Una vez se tienen estos valores para cada detector, se establece uno de ellos como referencia (detector 1) y se calcula el desplazamiento de los demás con respecto a este detector de referencia.

Para realizar esta calibración, la aplicación desarrollada se conecta al ordenador de control y ejecuta un programa que se encarga de adquirir un número determinado de paquetes de datos en un modo especial (modo timeshifts). En este modo, la electrónica de adquisición de datos recibe eventos de forma periódica por medio de una señal de test. Los eventos se envían exactamente en el mismo momento a los ADC de cada uno de los detectores instalados en el sistema, por lo que sus marcas de tiempo asociadas deberían ser iguales. Una vez se ha adquirido un número de paquetes seleccionado en la aplicación desarrollada, ésta se encarga de procesarlos para determinar el valor medio obtenido en la marca de tiempo fina para cada conversor A/D. Con estos valores, se calcula la diferencia entre los valores obtenidos en el detector 1 (referencia) y los demás elementos del sistema (en este caso solo hay otro detector). La diferencia en el valor de la marca de tiempo, se guarda en el archivo de corrección correspondiente, y se aplica a los eventos adquiridos durante una adquisición de datos con la máquina para corregir desviaciones en la medida del instante de llegada de los eventos a los detectores.

Para considerar todos los TDC como calibrados:

1. El FWHM del histograma de valores obtenidos para cada TDC debe ser menor que 4 bins de cuantificación del ADC. Si alguno de los canales no cumple este criterio, supondremos que ese canal tiene algún problema a nivel de Hardware e informaremos al usuario, para que de parte al servicio técnico.

NOTA: determinar con precisión de ps el tiempo de llegada de los eventos no es un requisito en la técnica SPECT. Sin embargo, el sistema de adquisición de datos utilizado en este desarrollo incluye la posibilidad de hacerlo por lo que se decidió incluir en el software una utilidad para calibrar los TDC. El incluir esta información, puede hacer que el sistema desarrollado pueda funcionar también en modo PET, pero todo el trabajo relacionado con esa característica esta fuera del ámbito de este proyecto de fin de carrera.

4.2.2 Módulo de comunicación

Como se ha comentado anteriormente, la aplicación desarrollada hace uso de la consola de adquisición de datos que se encarga de adquirir datos para la calibración de pedestales o de timeshifts **[10]**. Para ello la aplicación desarrolla se conecta al ordenador de control desde el ordenador del usuario mediante SSH y envía las ordenes oportunas utilizando comandos del terminal Linux. Una vez se han adquirido los datos para la calibración, los archivos se mueven desde la máquina de adquisición a la máquina donde se ubica la consola de calibración mediante FTP. Una vez que tenemos los ficheros adquiridos en la consola de usuario la aplicación para la calibración por pedestales procesa los datos contenidos en los ficheros para realizar las representaciones gráficas y cálculos correspondientes. Tras finalizar el algoritmo de calibración, el programa genera un fichero de calibración por pedestales y timeshift con las calibraciones adecuadas, (ver su contenido específico en el apartado 7.1.2.2 del presente documento) y, lo copia a la máquina Linux para que pueda ser posteriormente utilizado por el software de adquisición de datos. Este proceso, se ha ilustrado en la figura 4.2.

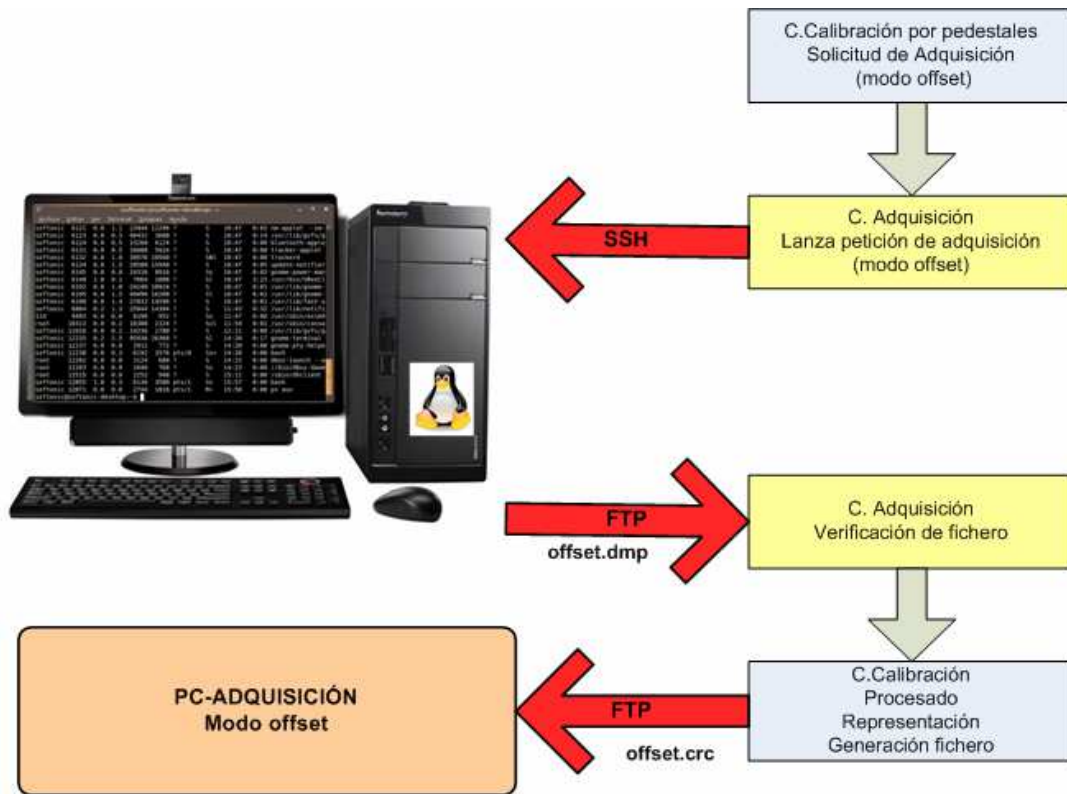


Fig 4.2.- Protocolo de comunicación en ACQ-SYSTEM

4.2.3 Ficheros de entrada y salida

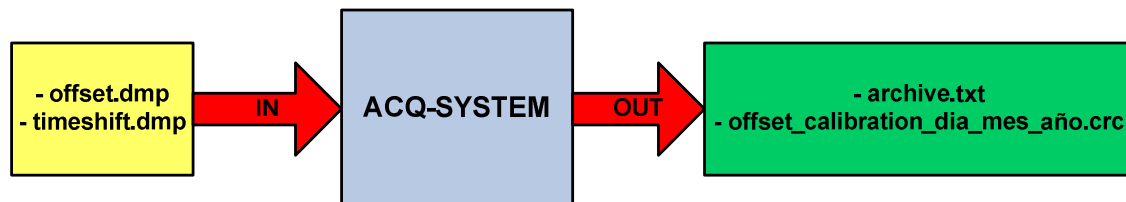


Fig 4.3.- Ficheros de entrada y salida de ACQ-SYSTEM

En la figura 4.3 podemos ver que este apartado del interfaz de calibración, utiliza como archivos de entrada: los ficheros `offset.dmp` y `timeshift.dmp`, que se generan en el software de adquisición ubicado en Linux en respuesta a peticiones específicas. Tras procesar estos ficheros, la aplicación desarrollada genera un archivo de salida con los datos de calibración de pedestales y timeshift (`offset_calibration_dia_mes_año.crc`), y a su vez actualiza otro archivo en la máquina Linux, denominado `archives.txt` en el cual le indica al software de adquisición que el nuevo archivo de calibración de pedestales y timeshifts es el anteriormente generado (.crc). El archivo `archives.txt`, tiene como objetivo informar al programa de adquisición, cuales son los archivos que tiene que utilizar para realizar diferentes correcciones. Por ello, cada vez que se copian o actualizan archivos de corrección en la máquina Linux, la aplicación que lo hace actualizará este archivo para indicarle al software de adquisición la existencia de las nuevas correcciones. El contenido exacto de los ficheros de salida está explicado en el apartado 7.1.2 del presente documento.

4.2.4 Desarrollo del software de calibración por pedestales.

Para la generación del fichero de calibración por pedestales la herramienta cuenta con la siguiente interfaz (figura 4.4).

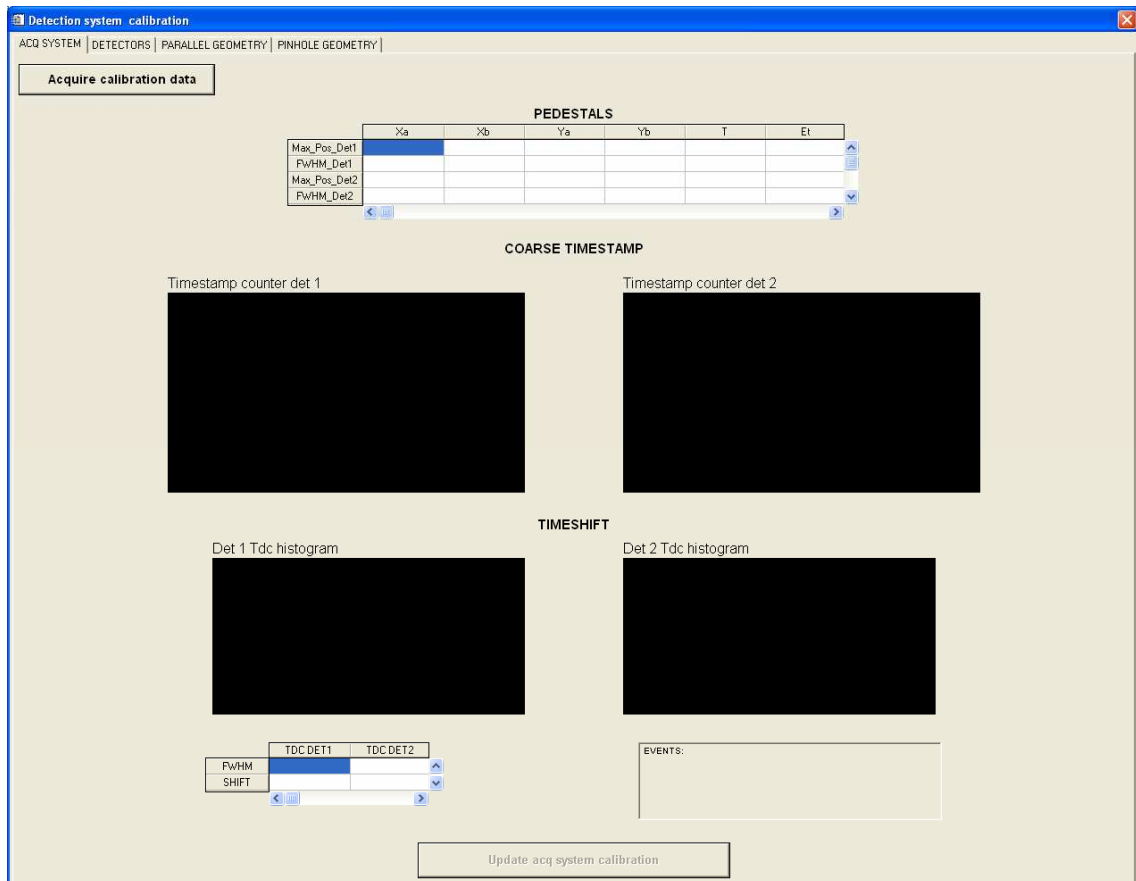


Fig 4.4.-Ventana para corregir las componentes de pedestales.

Dentro de la pestaña “**Detection system calibration**” encontraremos un botón llamado “**Acquire calibration data**”. Al pulsarlo nos aparecerá una pantalla como la siguiente:

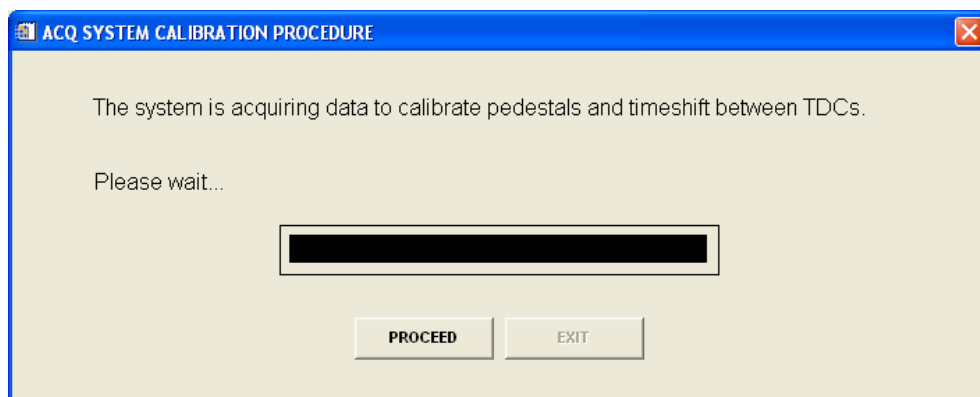


Fig 4.5.- Ventana mostrada durante la adquisición de los datos necesarios para calibrar la electrónica de adquisición de datos.

Al pulsar el botón PROCEED que se muestra en la figura 4.5 el programa adquiere 50000 paquetes de datos en modo offset y posteriormente 50000 paquetes en modo timeshift. Estos datos nos permitirán obtener los ficheros necesarios para realizar la calibración por pedestales y timeshift. El programa se conectará a la máquina Linux, y se colocará en el Path correspondiente de la máquina linux (ver ruta en tabla 9.1) realizando las siguientes tareas:

- Eliminará cualquier archivo *offset.dmp* y *timeshift.dmp* previo (orden bash: *rm -rf *.dmp*).
- Ejecutará el programa encargado de realizar una adquisición de calibración de pedestales orden: *./offsets n°paquetes=50000*. El programa tras su ejecución, generará un archivo llamado “*offsets.dmp*” con los datos digitalizados en vacío para cada canal.
- Cuando se termine la ejecución del programa *offsets*, éste generará un fichero *offsets.dmp*. Inmediatamente después pasamos a realizar la adquisición de paquetes para el modo timeshift orden: *./timeshit n°paquetes=50000*. El programa tras su ejecución, generará un archivo llamado “*timeshifts.dmp*” con los datos para cada canal.
- Una vez que se ha terminado la ejecución de timeshift correctamente, el programa se traerá a la máquina Windows los archivos *offset.dmp* y *timeshift.dmp* generados, mediante FTP y se activará el botón EXIT. Ver ruta destino en tabla 9.2
- Cuando pulsemos el botón **EXIT** regresaremos a la ventana Detection system calibration y continuaremos con el flujo normal del programa.

Una vez realiza la adquisición de datos *offset.dmp* y *timeshift.dmp* la aplicación comprueba la existencia de los mismos en la ruta destino mencionado anteriormente. Si todo es correcto la aplicación procesa el archivo *offset.dmp* y muestra una tabla que contiene la posición de los máximos de cada uno de los canales, calculando además el FWHM (Full Width at Half Maximun) asociado.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla de la parte superior de la ventana “Detection system calibration” y de nombre Pedestals.

PEDESTALS						
	Xa	Xb	Ya	Yb	T	Et
Max_Pos_Det1	29.0000	24.0000	23.0000	26.0000	27.0000	26.0000
FWHM_Det1	0.737088	0.710488	0.750305	0.726889	0.760061	0.616424
Max_Pos_Det2	29.0000	24.0000	23.0000	26.0000	27.0000	26.0000
FWHM_Det2	0.737088	0.710488	0.750305	0.726889	0.760061	0.616424

Fig 4.6.- Tabla que muestra un ejemplo con las posiciones máximas y los FWHM asociados para cada canal y por detector.

El proceso para determinar los datos mostrados en la tabla de la figura 4.6 consiste en detectar la posición del máximo y obtener la anchura a mitad de altura (FWHM) de cada canal. Para obtener el FWHM, el histograma de cada uno de los canales se ajusta a una Gaussiana. El FWHM para cada canal se obtendrá como:

$$(9) \quad M = 2.35 * \text{sigma.}$$

Siendo sigma la sigma de la Gaussiana obtenida.

Tras esto, el programa procesa los datos del archivo *timeshift.dmp* mostrando por pantalla las marcas de tiempo gruesas adquiridas para cada detector, y el histograma de valores obtenido para cada TDC. En la figura 4.7, se muestra el histograma de los valores de la marca de tiempo gruesa de cada detector. Dado que esta marca es un contador de 28 bits que se incrementa con una frecuencia de 20Mhz, lo que obtenemos al representar el histograma de los valores obtenidos durante la adquisición es una señal de tipo diente de sierra que aumenta de forma constante desde 0 hasta $2^{28}-1$, y luego vuelve a empezar desde 0.

La representación gráfica de esta señal permite determinar que ambos detectores ven correctamente la marca de tiempo gruesa.

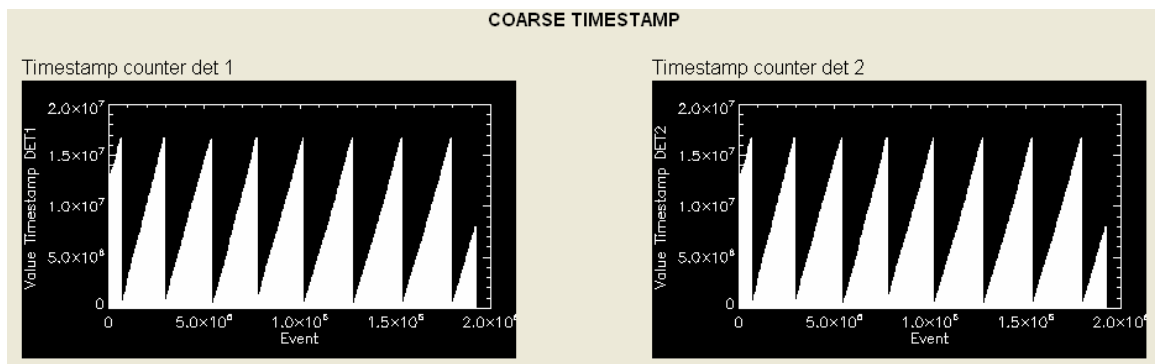


Fig 4.7.- Representación del timestamp grueso asociado a cada detector para un conjunto de eventos

A su vez, el programa representa en un histograma los valores del timestamp fino para cada detector y los muestra por pantalla tras aplicarle a los canales correspondientes al TDC la corrección de offsets anteriormente obtenida.

- El valor resultante de para cada detector será representado en las ventanas *Det 1 TDC histogram* y *Det 2 TDC histogram*. Estos histogramas resultantes, serán ajustados a Gaussianas que también se representarán en las ventanas correspondientes con un color distinto al del histograma.

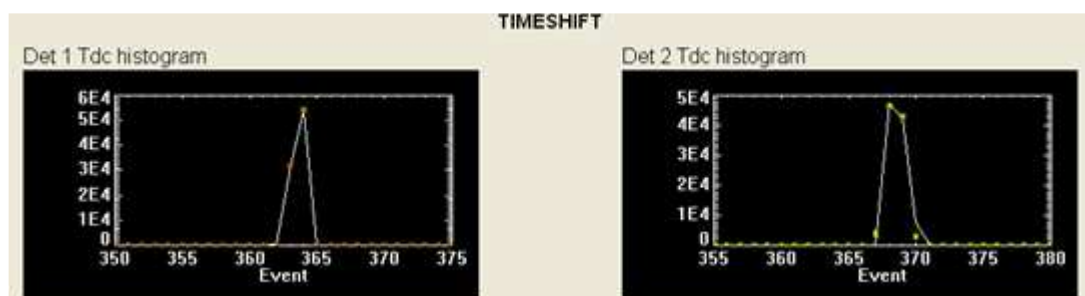


Fig 4.8.- Representación del valor obtenido para cada TDC (Time-to-digital converters) para cada detector

En la tabla inferior de la ventana se guardan los FWHM de cada uno de los dos valores del TDC y se calcula los valores de desplazamiento de uno con respecto a otro tomando como referencia el detector 1:

- Shift_det_1=0
- Shift_det_2= Max_pos_det1-Max_pos_det_2

	TDC DET1	TDC DET2
FWHM	1.58872	1.70710
SHIFT	0.000000	3.00000

Fig 4.9.- Tabla de resultado del TDC

Update acq system calibration

El botón se activará cuando se puedan generar correctamente los archivos de calibración.crc y no se detecten errores hardware en ningún canal. Al pulsarlo realizamos las siguientes actividades:

- Los datos mostrados en la tabla PEDESTAL de figura 4.6 y el valor shift de la figura 4.9 para cada TDC se guardan en un archivo de nombre '**offsets_calibration_día_mes_año.crc**'. La ubicación

del mismo será en la carpeta que indica la tabla 9.2. El formato de este archivo podemos verlo en el apartado 7.1.2.2 del presente documento.

- La aplicación se conectará a la máquina Linux y copiará en la ruta (ver tabla 9.3) los archivos generados durante el proceso.
- Actualizará el contenido del archivo “*archives.txt*” (ver apartado 7.1.2.1) con el nombre del nuevo archivo de corrección de pedestales generado y lo subirá al path correspondiente de la máquina Linux ver tabla 9.3.

Tras asegurarse que el proceso ha sido un éxito, el programa lo informará mediante un mensaje por pantalla y mostrará al usuario la siguiente pantalla.

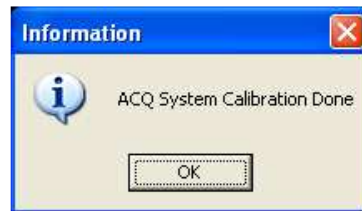


Fig 4.10.- Texto de información que nos indica que la calibración ACQ se ha realizado con éxito

Para detectar que el sistema de adquisición está en buen estado se atenderá a dos criterios básicos, en caso de que no se cumplan se mostrará un mensaje al usuario explicándole esta situación:

- La posición de los máximos de todos los canales puede variar como mucho en 5 bins de cuantificación (respecto a la media).

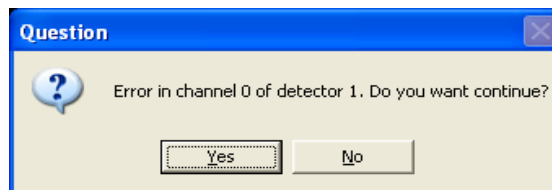


Fig 4.11.- Cuadro de información, que indica error en el canal cero del detector 1, debido a sobrepasar el rango de 5 bins permitidos.

- El valor del FWHM ha de ser menor de 1 canal en todos los casos, en caso de no cumplirse nos lo informará mediante un mensaje como el que se muestra a continuación.

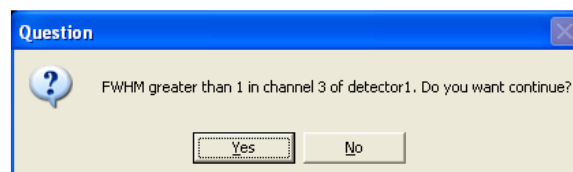


Fig 4.12 .- Nos indica que FWHM es mayor a 1 bin en el canal 3 del detector 1

En caso de seleccionar 'SI' continuaremos con la aplicación normalmente pero en caso de seleccionar 'NO' pararemos la ejecución, fijaremos los resultados a cero y no generaremos un fichero de calibración al estar el botón **Update acq system calibration** inhabilitado para el usuario.

4.2.5 Implementación de la calibración para la corrección de pedestales y timeshift

En IDL hemos implementado los siguientes procedimientos y funciones para realizar la corrección de pedestales:

Procedimiento implementado:**spect_acq_system_calibration_interface_event, event**

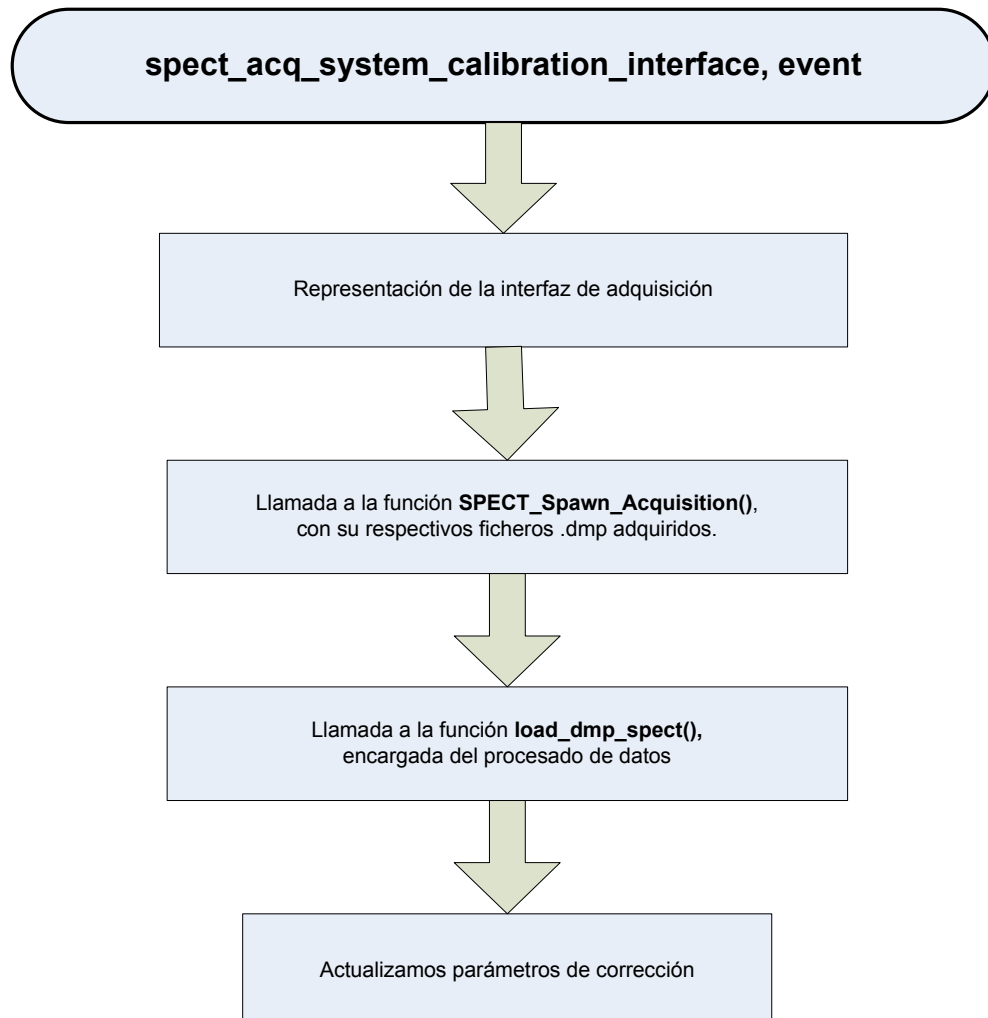
Procedimiento encargado de representar la interfaz necesaria para la adquisición de los ficheros offset.dmp y timeshift.dmp. Se hace uso de la llamada a la función SPECT_Spawn_Acquisition.

Argumentos de entrada:

Event.- Se pasa como parámetro el identificador de la ventana, que sirve para asignar la ventana con el foco principal.

Argumentos de salida:

Parámetros internos de confirmación. '1' nos indica que todo ha funcionado correctamente '0' que existe error.

Diagrama de flujo

Función implementada:**load_dmp_spect()**

Función que se encarga de procesar los datos leídos de los ficheros offset.dmp y timeshift.dmp, generar el fichero de calibración "offset_dia_mes_año.crc" y mostrar los resultados en la ventana principal.

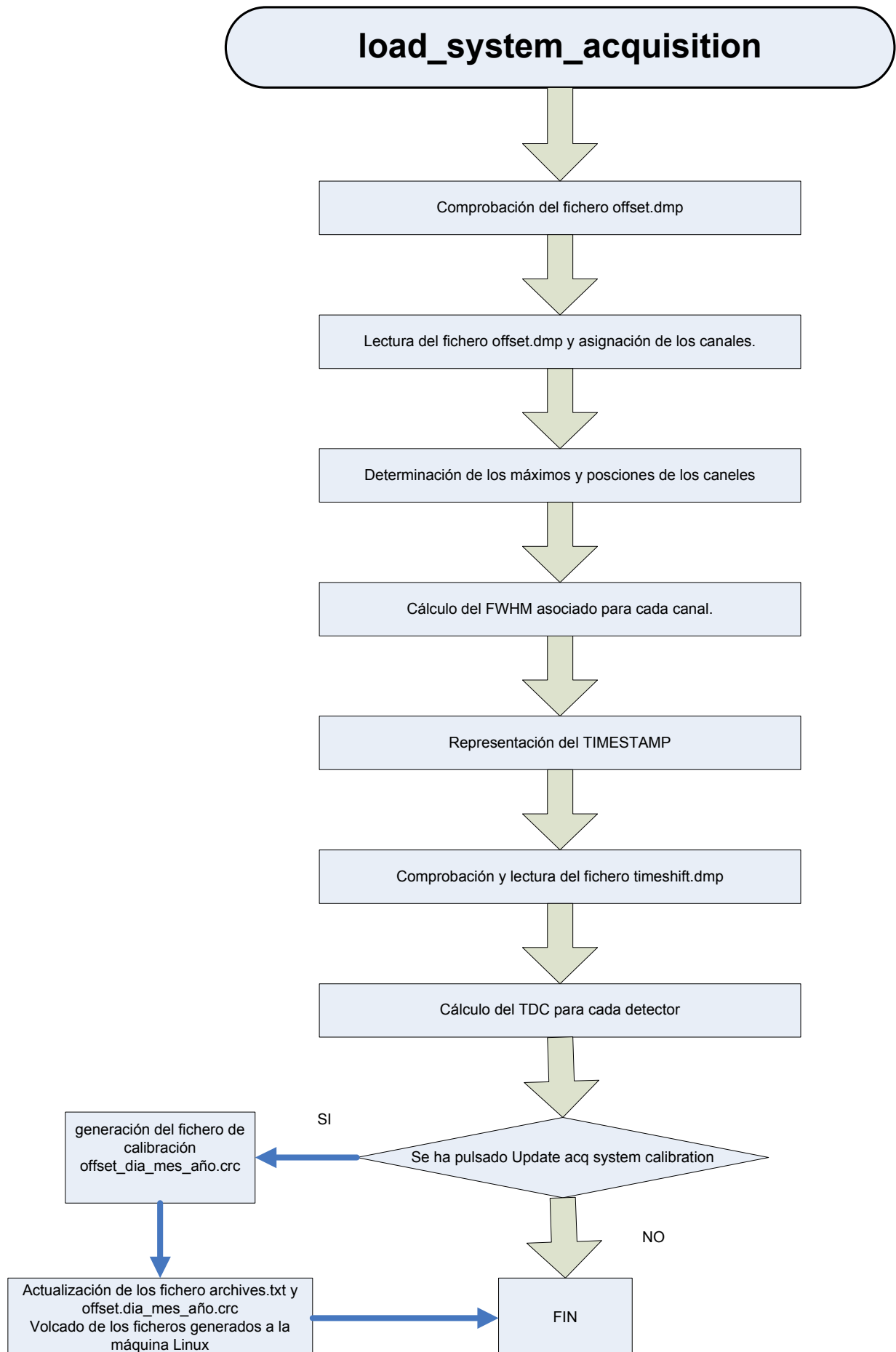
Argumento de entrada:

Ninguno → Los nombres de los archivos a procesar son siempre los mismos y están en un archivo de configuración de la aplicación.

Argumentos de salida:

Parámetros de confirmación '1' informa que toda se ha realizado correctamente, cualquier otro resultado devuelto se consideraría como error.

Diagrama de flujo:



4.3 DETECTORS

En DETECTORS se realizan las correcciones intrínsecas al detector como son no uniformidad y el ajuste de posiciones de los picos de energía (ver apartado 2.4.4.3 del presente documento y [19]).

4.3.1 Explicación teórica de la corrección

Para las correcciones intrínsecas de los detectores se parte del conjunto de adquisiciones de calibración. Esta adquisición se obtiene irradiando los detectores sin utilizar colimador con una fuente plana rellena con 99mTc colocada en medio de los mismos. El procesado que se realiza de forma resumida es el siguiente:

Una vez que se han adquiridos los datos de calibración, se generan imágenes de llenado de campo de 256x256 píxeles. Estas imágenes de llenado de campo, son un histograma de las posiciones de interacción X e Y obtenidas para cada detector. Una vez generadas, a partir de ellas se obtienen unas tablas de búsqueda denominadas LUT (ver 7.1.1.3) que permiten asociar cada elemento de la matriz de cristales con un conjunto de píxeles de la imagen de llenado de campo y de esta manera, asociar posiciones X e Y a cristales específicos y obtener el espectro de energía asociado para cada cristal. Posteriormente mediante la posición máxima de los fotopicos del 99mTc (140 KeV) calculamos la correspondencia entre canal ADC y energía (medido en KeV) para cada cristal de la imagen. Tal correspondencia se almacena en el fichero de calibración en la columna correspondiente al factor de ajuste de energía para cada cristal de cada detector. Este factor de corrección, es básicamente un ajuste de escala. Tras aplicarlo, es a su vez necesario calcular un desplazamiento de cada espectro a la posición de referencia para alinear todos los espectros de energía. Una vez hecho esto, el siguiente paso de calibración consiste en corregir la no uniformidad donde se compara el número de cuentas de cada píxel con el valor medio en el CFOV durante la adquisición realizada con 99mTc. Tal resultado es almacenado en el correspondiente fichero de calibración en la columna factor uniformidad. Ver 7.1.2.3.

De esta forma conseguimos factores de corrección capaces de compensar la eficiencia relativa de cada píxel del detector. Para que luego cada imagen adquirida, sea procesada utilizando la tabla de búsqueda de cristales (LUT) y los factores de corrección de energía y uniformidad obtenidos durante el proceso de calibración.

4.3.2 Módulos de comunicación

Para realizar la corrección de uniformidad la aplicación desarrollada hace uso de programas internos del laboratorio como son **INTERFAZLUZ** [12]. Programa escrito en IDL, que tiene como objetivo principal obtener la lut a partir de su imagen de llenado de campo correspondiente, ver descripción de LUT en 7.1.1.3 del presente documento. El flujo de procesado de la aplicación se muestra en la figura 4.13.

La aplicación de calibración por uniformidad consiste en realizar una adquisición de datos siguiendo los pasos que se indica en Acquire New Calibration del 4.3.4 del presente capítulo. Cuando tenemos los ficheros adquiridos en la máquina Linux se realiza el correspondiente envío de los mismos a la consola de usuario en Windows mediante protocolo FTP.

Posteriormente la aplicación procesa los datos y genera un fichero de calibración para los datos adquiridos. Mediante el botón correspondiente de actualización la aplicación representa y calcula los resultados de la corrección por uniformidad. Finalmente desde la consola de usuario realizamos el correspondiente envío de fichero con los resultados de la calibración por uniformidad, hacia el PC de adquisición mediante una comunicación FTP. Ver contenido del fichero de uniformidad en el apartado 7.1.2.3 del presente documento.

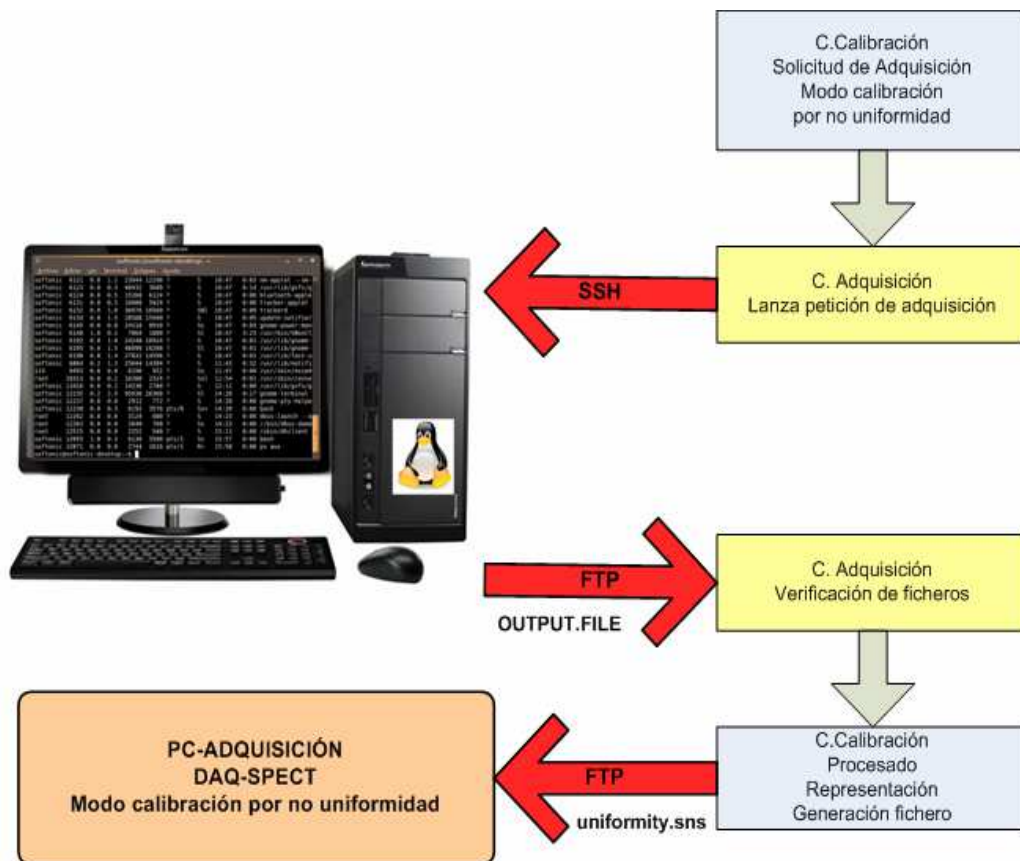


Fig 4.13.- Protocolo de comunicación en DETECTORS

4.3.3 Ficheros de entrada y salida

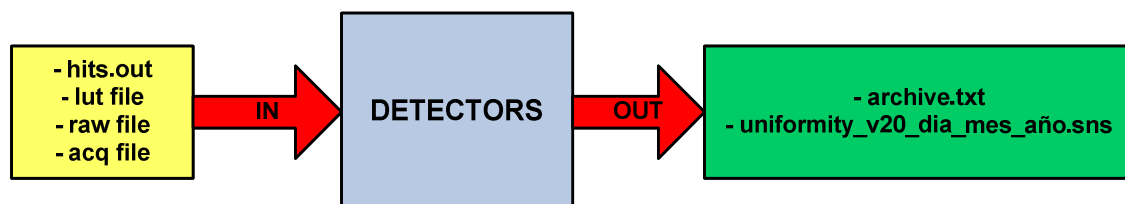


Fig 4.14.- Ficheros de entrada y salida en DETECTORS

En la figura podemos ver que esta aplicación, denominada DETECTORS, hace uso de los ficheros denominados hist.out, lut, imgs.raw y el archivo .acq, todos generados por el software de adquisición ubicado en Linux. Los ficheros de salida generados por la aplicación son archives.txt que como en el caso anterior contiene los nombres actualizados de los ficheros de calibración y uniformity_v20_dia_mes_año.sns con los resultados de calibración de uniformidad.

4.3.4 Desarrollo del software de calibración por no uniformidad y picos de energía

Cuando pasamos a la pestaña Detectors de la ventana “Detection system calibration” obtenemos una ventana como la mostrada en la figura.4.15, en principio estarán activados los botones **Acquire new calibration** y **Process previously acquired calibration**.

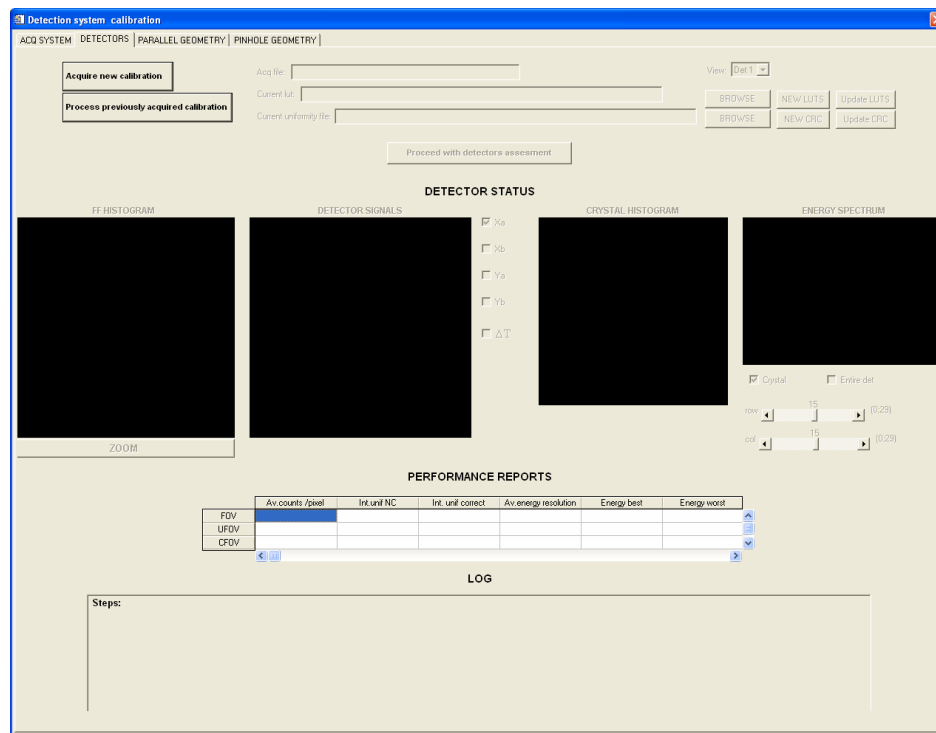


Fig 4.15.-Ventana que muestra la calibración para DETECTORS

Estos botones nos permiten elegir entre:

- Botón *Acquire new calibration*.- Realizar una nueva adquisición de datos desde cero.
- Botón *Process previously acquired calibration*.- Procesar una adquisición previamente almacenada.

Acquire new calibration

Al pulsar *Acquire new calibration* obtendremos una nueva ventana de nombre *Flood Calibration Procedure* como la que se muestra en la figura 4.16. Esta ventana permite realizar la adquisición de un nuevo estudio y para ello es necesario seguir una serie de instrucciones que la aplicación desarrollada se encargara de dar al usuario:

Flood Calibration Procedure

INSTRUCTIONS:

1. Fill the calibration phantom with an uniform Tc99m concentration and attach it to the calibration bed.
2. Attach the calibration bed to the system.

Bed detected:
☐ Mouse ☐ Rat ☒ Cal ☐ None

Collimators detected:
☐ Pinhole ☐ Parallel ☒ None

3. Select acquisition parameters.

Study duration [min]: 10

Study name: name_study
4. Press <START> to launch the acquisition.

Acquisition estimated duration: 0:00 mins.
Wait, setting up the mechanical system.

Elapsed time (s):
Count rate (cps):
Current bed position:

Current frame:
Projection:
Angular position:

END

ABORT

EXIT

START

Hide Window

Fig 4.16.-Instrucciones a seguir para una nueva adquisición

Descripción de las instrucciones:

1.-Nos recuerda que debemos rellenar el maniquí de calibración con una concentración uniforme de ^{99m}Tc y colocarlo en la cama de calibración.

2.-Colocación del tipo de cama y colimador para realizar la correspondiente prueba de calibración. En versiones futuras de la máquina FSPECT, esta será capaz de detectar cuales son la cama y los colimadores con los que se ha equipado. Para realizar esta calibración, el sistema debería haber detectado una **cama de tipo calibración** y **no detectar colimador**. Si este es el caso, se podrá continuar con la adquisición de datos en modo calibración, ya que en caso contrario la instrucción 3 permanecerá bloqueada a espera de la colocación de cama y colimador adecuados. En esta versión de la máquina, dado que el hardware para detectar cual es el colimador y cual es la cama con la que esta equipada la máquina, es necesario que el usuario seleccione en esta pantalla estos valores para poder continuar.

En futuras versiones, la detección del tipo de cama y colimador las realizaremos a través de una comunicación constante con la máquina Linux, la cual nos informará cada 10 segundos el estado de la misma. Los datos devueltos de esta comunicación se reflejarán en un fichero con extensión txt el cual será leído cada cierto tiempo y permitirá actualizar la pantalla de adquisición y de esta manera al detectar los parámetros adecuados en cuanto al tipo de cama y colimador.

3.-La tercera instrucción nos solicita la inserción de dos parámetros, por una parte el tiempo de estudio que puede variar entre 10 y 120 minutos en pasos de 10 minutos y por otra nos solicita insertar un nombre específico del estudio, este nombre es el que se asignará a fichero con extensión .ACQ, por defecto se asignará un nombre de la forma: 'F_Calibration_ddd_mm_yyyy', pero puede ser modificado a gusto del usuario.

4.-El botón **START** de la figura 4.16 se activa cuando todos los datos solicitados en los pasos anteriores son correctos. Una vez pulsado, su función es solicitar a la máquina Linux una adquisición de datos en modo calibración con un tiempo de estudio y nombre de estudio asociado. Durante la adquisición de datos se desactiva el botón **Cancel** y se activan los botones **Abort** y **Exit** que permiten al usuario en cualquier momento abortar o salir de la adquisición respectivamente. La principal diferencia entre ambos botones radica en que al pulsar el botón '**Abort**' salimos de la adquisición sin almacenar los datos adquiridos, mientras que al pulsar '**Exit**' almacenamos los datos adquiridos hasta el momento, regresando a la ventana mostrada de la figura 4.15.

Durante la adquisición de datos podemos ver el estado en el que nos encontramos mediante un conjunto de datos que se actualizan en esta pantalla (ver figura 4.17).

Acquisition estimated duration: 0:00 mins.			
Acquisition Time left: 0:00 mins.			
Elapsed time (s):	0	Current frame:	1
Count rate (cps):	0.000000	Projection:	1
Current bed position:	1	Angular position:	1

Fig 4.17.- Zona informativa del estado de adquisición con la máquina FSPECT

Campos informativos:

- Elapsed time (sec).- Indica el tiempo transcurrido de la adquisición medido en segundos.
- Count rate.- Tasa de conteo instantáneo, es decir número de cuentas por segundo.
- Current bed position.- Número de posición de la cama actual, siempre va a ser uno en una adquisición de calibración.
- Current frame.- Número de frame o cuadro actual, siempre 1 en adquisición de calibración.
- Projection.- Número absoluto de la proyección, siempre 1 en adquisición de calibración.
- Angular position.- Posición angular en la que se encuentra el anillo, siempre 1 en adquisición de calibración.

Cuando finaliza la adquisición y todo es correcto, la aplicación encargada de la adquisición generará los archivos de entrada al software de calibración.

Para continuar, la aplicación comprueba que exista el directorio con los ficheros necesarios y además que estos no estén vacíos, posteriormente se realiza la lectura correspondiente del **fichero.acq** (ver descripción del mismo en el apartado 7.1.1.1 del presente documento). A partir del fichero.acq, de nombre igual al introducido en la instrucción 3 de Acquire new calibration figura 4.16, obtenemos los nombres de los ficheros lut y uniformity, sus nombres se escribirán en los campos Current lut y Current uniformity file respectivamente (ver figura 4.18).

Acq file: spect_acq.ACQ	View: Det 1 Det 1 Det 2	BROWSE	NEW LUTS	Update LUTS
Current lut: lut_1_1_jun_11		BROWSE	NEW CRC	Update CRC
Current uniformity file: uniformity_1_02_Jun_2011.sns				

Fig 4.18.- Campos leídos desde el fichero .ACQ.

Los campos Current Lut y Current Uniformity file no serán editables, pero pueden ser modificados al pulsar el botón **BROWSE**. Es necesario tener presente que en caso de no seleccionar las correctas extensiones

del fichero o contenidos diferentes a los necesarios la aplicación nos lo informará mediante un mensaje como el que muestra la figura 4.19 y nos fijará por defecto los datos leídos en el fichero .ACQ.



Fig 4.19.- Ventana que nos indica la incorrecta lectura del fichero lut

Proceed previously acquired calibration

Como hemos mencionado, la aplicación permitirá seleccionar una adquisición previa e imprimirá los correspondientes nombres en los respectivos campos. Si decidimos utilizar esta opción para procesar datos adquiridos con anterioridad, debemos simplemente seleccionar el archivo ACQ correspondiente y a partir de ese momento, el flujo de trabajo es el que se relata a continuación.

Pasos que realizamos para obtener los ficheros de calibración:

Una vez que hemos leído los ficheros ACQ, LUT, UNIFORMITY, mediante el campo 'View' podemos seleccionar entre los dos detectores del sistema (detector A o B)

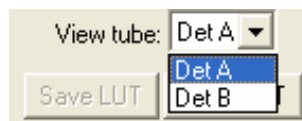


Fig 4.20- Selección del detector

Sí todo es correcto se activa el botón ***“Proceed with detectors assesment”***. Al pulsarlo procesamos algunos ficheros de la adquisición como son: la imagen de llenado de campo, lut correspondiente para cada cristal, fichero hist.out que contiene el histograma de cada uno de los canales asociado a cada detector (Xa, Xb, Ya, Yb, ΔT , ΔE), ficheros obtenidos en la adquisición actual o previa, según sea el caso, a continuación se explica que es cada uno de estos elementos y su utilidad.

Descripción de los datos generados:

FF Histogram.- 'Field Flood' Nos muestra la imagen de llenado de campo de dimensiones 256x256 píxeles, ver más detalle en 7.1.1.2 del presente documento. Adicionalmente en la figura 4.21 se representa la rejilla de ajuste asociada para la imagen de llenado campo en estudio. La función principal de la rejilla es decirnos que píxeles de la imagen de 256x256 se corresponden con los cristales de 30x30, en otras palabras la rejilla agrupa la imagen de 256x256 en una imagen de 30x30.

La imagen de llenado de campo la obtenemos a partir de la lectura al fichero det_1_frame_1_bed_1_spin_1_proy_0_superYZ_00.raw que es de 256x256x256 siendo su tercera dimensión la energía de los eventos detectados. La representación mostrada en nuestra pantalla es de 256 x 256 y se adquiere sumando todas las energías (sumar todas las imágenes correspondientes a la tercera dimensión para obtener una imagen de 256 x 256 a partir de la imagen de 256x256x256). Para graficar la rejilla (figura 4.21) se hace uso de la lut o tabla de búsqueda asociada a la imagen de llenado de campo, datos que hemos adquirido mediante las correspondientes lecturas de los ficheros LUT. Ver información de LUT en el apartado 7.1.1.3 del presente documento.

Podemos comprobar que los bordes de la rejilla se corresponden con la imagen de los cristales de figura 4.24.a. Este resultado lo obtendremos siempre o casi siempre para las primeras

comprobaciones de calibración, ya que conforme pase el tiempo los componentes del sistema como cabe de esperar sufrirán ligeras variaciones.

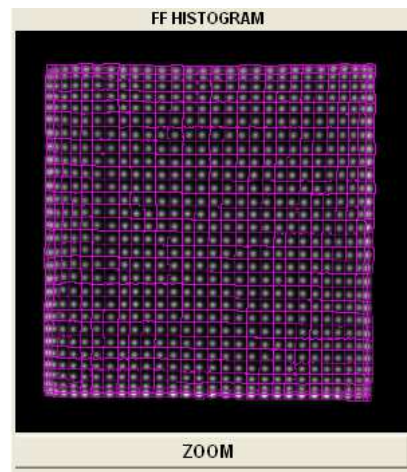


Fig 4.21 - Representación de la imagen de llenado de campo y la

En la parte inferior de FF HISTOGRAM tenemos un botón de nombre ZOOM, al pulsarlo abriremos una nueva ventana que amplía el tamaño de la imagen mostrada en FF HISTOGRAM de la pestaña Detector, de esta manera el usuario podrá ver el ajuste entre la imagen de llenado de campo y rejilla con mayor facilidad.

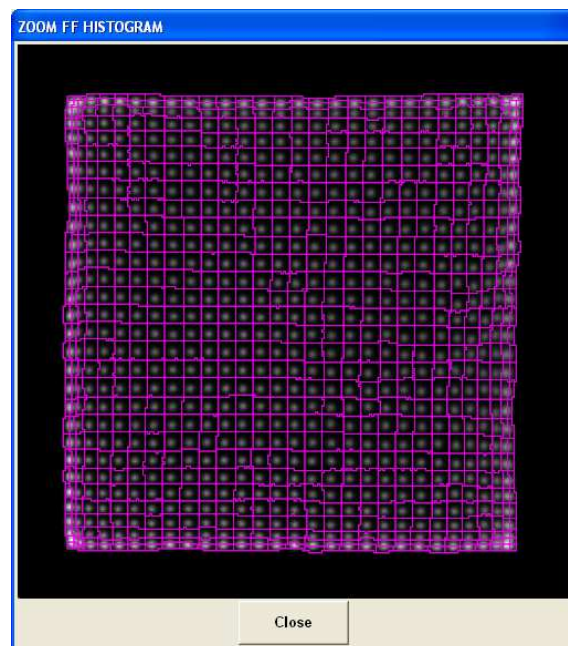


Fig 4.22 .- Ventana que obtenemos al pulsar ZOOM

Cuando la imagen de llenado de campo y las rejillas correspondientes a la lut no están correctamente centradas o ajustadas, podemos generar un nuevo fichero lut, para cada detector mediante el botón NEWLUT.

- **Detectors Signals.-** Representa el histograma de la señal digitalizada, se obtienen a partir de la lectura del fichero hist.out obtenido en la adquisición, este fichero contiene el histograma de cada uno de los canales asociados a cada detector (X_a , X_b , Y_a , Y_b , ΔT , ΔE).

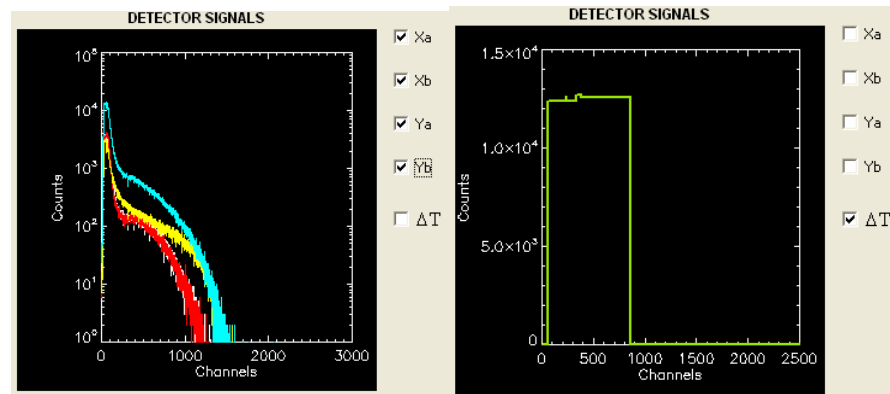


Fig 4.23.- A la derecha la visualización de cuentas de los 4 canales en representación logarítmica y a la izquierda el T (timestamp)

En la figura 4.23 podemos ver que Xa, Xb, Ya, Yb se representan en escala logarítmica para el eje y, mientras que ΔT tienen una representación lineal en el eje y.

Crystal Histogram.- Muestra el histograma de los cristales de la imagen que obtenemos tras pasar la imagen de llenado de campo que consta de 256x256 píxeles y 256 canales de energía a una imagen de 30x30 cristales, cada uno de ellos con 256 posibles canales de energía. El cuadrado de color rojo representa a un cristal, que está relacionado con la posición elegida en la barra slider de figura 4.25. Para representar la imagen corregida en CRYSTAL HISTOGRAM la aplicación procesa la imagen de llenado de campo agrupada en cristales y multiplica cada cristal con su correspondiente valor de corrección. Ajustando cada valor a los KeV indicados en factor de ajuste y multiplicando cada valor de pixel por el factor de uniformidad. Estos factores de corrección como son el factor de ajuste, factor uniformidad y desplazamiento son leídos desde el fichero de calibración ver tabla de rutas 9.4:

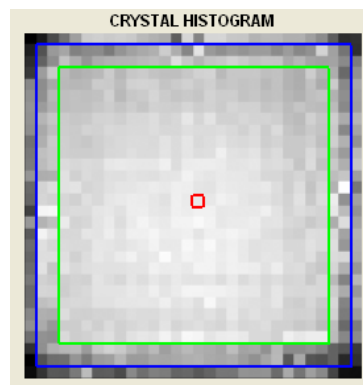


Fig 4.24.a.-Representación de los cristales de la imagen sin

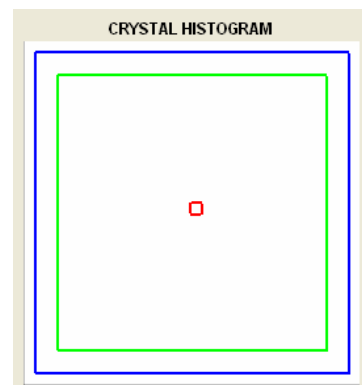


Fig 4.24.b.-Representación de los cristales de la imagen corregida. IDEAL que en la realidad no siempre se consigue.

- **Energy Spectrum.-** Nos muestra como su nombre lo indica el espectro de energía del cristal seleccionado mediante row y col. En particular la figura 4.25 representa el espectro de energía del cristal (15,15,*). Los espectros de energía que obtenemos son el resultado de aplicar la corrección de los picos de energía, que consiste en multiplicar cada posición del espectro por el factor escala del fichero de calibración y después aplicar un desplazamiento para dejar todos los picos en la misma posición.

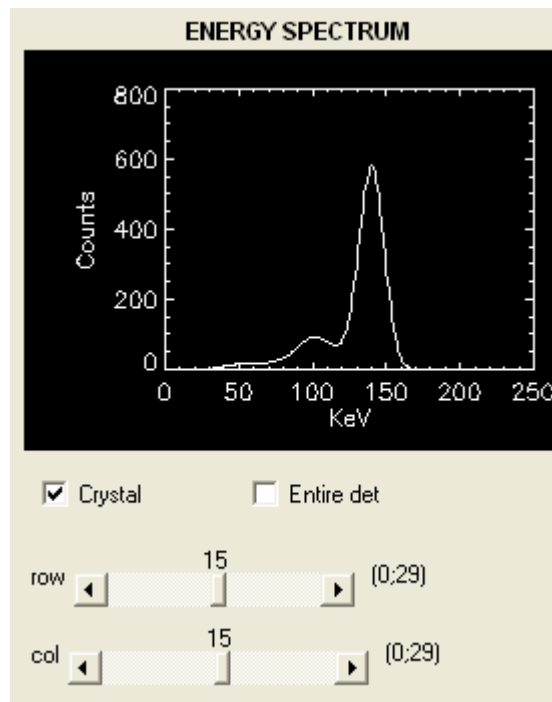


Fig 4.25.- Espectro de energía al que se le ha aplicado la corrección de los picos de energía para un cristal.

Al seleccionar **Entire det** calculamos la representación de energía espectral total para cada detector.

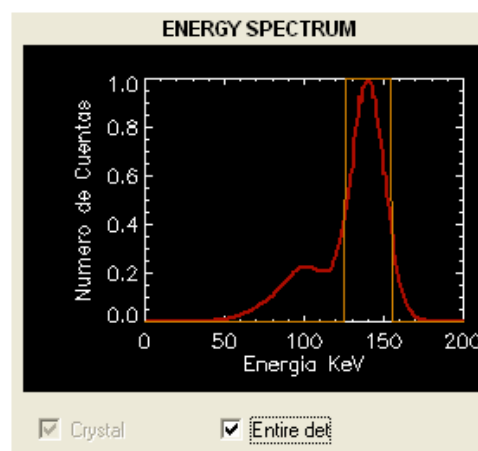


Fig 4.26.- Espectro de energía alineado y ajustado para el

La figura 4.26 se obtiene tras realizar un ajuste y alineamiento de todos los cristales de la cámara.

Los pasos a seguir para obtener los parámetros de ajuste y alineamiento son los siguientes:

- Partimos de la imagen de llenado de campo de 256X256X256 leída desde la ruta (ver tabla 9.5) y ajustada a las dimensiones 30x30x256 utilizando la LUT. Asumimos que el valor del fotopico para 99Tm es de 140 KeV, dato leído en el fichero .acq (ver 7.1.1.1).
- Al recorrer cada cristal de la imagen para todas las proyecciones realizamos un suavizado de los espectros mediante la función smooth de IDL[18] para eliminar posibles problemas debido al ruido.

- Calculamos el punto máximo del espectro de cada cristal y hallamos los límites superiores e inferiores de los espectros.
- Calculamos el factor de ajuste necesario para convertir los espectros de energías inicialmente obtenidos (cuyas unidades son los bins de cuantificación del ADC) a KeV, lo calculamos como lo indica la ecuación:

$$(10) \quad \text{factor_ajuste} = \frac{\text{fotopico} - \text{lim_inf_kev}}{\text{max} - \text{lim_inf}}$$

Donde fotopico es el valor definido anteriormente para 99mTc, lim_inf_kev es el parámetro del límite inferior en KeV, max es la posición del máximo valor de cuentas en el espectro y lim_inf es el límite inferior en el espectro.

- Con los espectros ajustados a KeV pasamos a calcular el FWHM de cada cristal y así representar los datos estadísticos en la tabla PERFORMANCE REPORTS en los campos de energy resolution.
- Finalmente cada espectro es desplazado según lo indica 'desplazamiento', que se calcula como la diferencia entre el punto máximo del espectro y el valor del fotopico. De esta manera obtenemos todos los espectros alineados y centrados en el valor del fotopico.

En la parte inferior de la ventana podemos comparar parámetros de la imagen sin corregir o corregidas, datos que nos permite verificar si la aplicación ajusta, alinea, o corrige correctamente.

PERFORMANCE REPORTS						
	Av. counts /pixel	Int. unif NC	Int. unif correct	Av. energy resolution	Energy best	Energy worst
FOV	19383.9	75.1257	0.0896738	12.0148	8.36124	21.7092
UFOV	19383.9	71.8918	0.0896738	12.0156	8.53022	21.7092
CFOV	18126.2	23.5376	0.0176112	11.0783	8.53022	12.7718

Fig 4.27.- Tabla que muestra los resultados de: cuentas por píxel, la uniformidad integral sin corregir y corregida, promedio de la resolución de energía, y energía mejor y peor para cada caso.

Estos valores se calculan como:

- **Av. counts/pixel.-** Promedio de cuentas que llegan por píxel. Se calcula realizando la media de la imagen de llenado de campo agrupada en cristales (30x30) dividida entre el número de cristales al cuadro.

$$(11) \quad \Delta v = \frac{\text{mean}(\text{datos_imagen_2D})}{\text{num_cristales}^2}$$

- **Int. unif nc.-** Uniformidad integral sin aplicar corrección. La imagen de llenado de campo se suaviza con un filtro de 3x3. El filtro que aplicamos cuenta con los siguientes pesos:

1	2	1
2	4	2
1	2	1

El resultado de la uniformidad integral se basa en las cuentas máximas y mínimas en los píxeles de la imagen que ha sido suavizada por el Kernel anterior y se define como:

$$(12) \quad \text{Uniformidad_integral(\%)} = \frac{\text{max_pixel_count} - \text{min_pixel_count}}{\text{max_pixel_count} + \text{min_pixel_count}} \times 100$$

Y se calcula para los tres tipos de campos de visión FOV, CFOV y para el UFOV.

- **Int. Unif correct .-** Uniformidad integral corregida, se calcula como la uniformidad integral sin corregir, sólo que se utilizan los datos de la imagen corregida.
- **Av. Energy resolution.-** Promedio de la resolución de energía
- **Energy best.-** Mejor valor de resolución de energía. Es el valor de FWHM mínimo de todos los cristales, es decir valor de resolución de energía del mejor cristal del detector.
- **Energy worst.-** Peor valor de resolución de energía. Lo obtenemos a partir del mayor valor del FWHM.

Sí la corrección actual no es la adecuada, los espectros de energía no están alineados al valor del fotopico o los valores obtenidos en performance reports no estan dentro de límites razonables, es posible generar un nuevo fichero de calibración mediante el botón NEWCRC.

NEWCRC

Se activará una vez hayamos pulsado el botón Proceed with detector assesment. Se encarga de generar el archivo de calibración de nombre 'uniformity_detector_día_mes_año.sns' almacenándolo en la ruta que nos indica la tabla 9.4. Ver contenido del fichero de calibración por uniformidad en el apartado 7.1.2.3 del presente documento.

Si el fichero se ha generado correctamente se notificará al usuario mediante un mensaje como el siguiente:

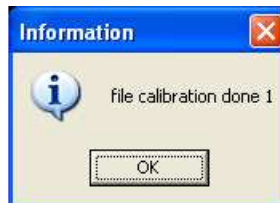


Fig 4.28.- Mensaje que informa que el fichero de calibración se ha generado correctamente

Si anteriormente se ha almacenado un fichero de calibración con el mismo nombre la aplicación nos lo informará y preguntará si se desea sobrescribir el fichero. El mensaje a mostrar es el siguiente:

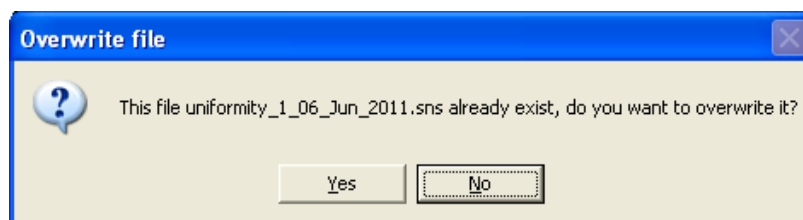


Fig 4.29.- Mensaje que nos pregunta si deseamos sobrescribir el fichero de calibración

Para actualizar en la aplicación el nuevo fichero de calibración generado es necesario seleccionar el fichero generado de ambos detectores, pulsando el botón **BROWSE**. Luego es necesario pulsar el botón **Proceed with detector Assesment** para procesar de nuevos los datos usando los nuevos archivos de corrección seleccionados.

UPDATE NEWCRC

Sólo estará activo cuando hayamos generado un nuevo fichero de calibración, mediante el botón NEWCRC.

Los pasos que seguimos al pulsar el botón UPDATE NEW CRC son los siguientes:

- 1.- Actualizar el fichero archives.txt (ver 7.1.2.1) con los actuales nombres de los ficheros de calibración generados.
- 2.- Subir a la máquina Linux el actual archives.txt con los nuevos nombres de los ficheros de calibración generados. Cuando se haya enviado correctamente el fichero archives.txt la aplicación nos lo informará con un mensaje como el que se muestra a continuación:

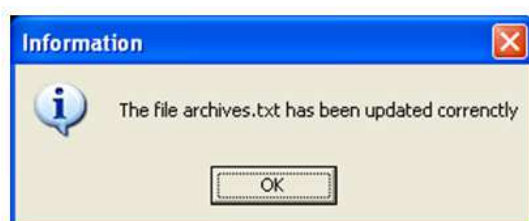


Fig 4.30.- Mensaje de confirmación. Envío correcto del fichero archives.txt

- 3.- Se envía a la máquina Linux los nuevos ficheros de calibración generados anteriormente con el botón NEW CRC, uno por detector. La ubicación de los mismos será el que nos indica la tabla 9.3.

Si el fichero ha sido enviado correctamente se notificará al usuario mediante el mensaje:



Fig 4.31.- Informa del envío correcto del fichero de calibración para el detector 1.

En caso contrario mostraremos un mensaje de error.

A su vez al pulsar 'Proceed with detectors assesment', volvemos a calcular los datos de la imagen en estudio actualizando los resultados en PERFORMANCE REPORTS

PERFORMANCE REPORTS						
	Av.counts /pixel	Int.unif NC	Int. unif correct	Av.energy resolution	Energy best	Energy worst
0	0.295775	24.1033	0.000000	13.2487	9.81791	30.0065

Fig 4.32.- Tabla actualizada que muestra los resultados de: cuentas por píxel, la uniformidad integral sin corregir y corregida, promedio de la resolución de energía, y energía mejor y peor para cada caso.

En la parte inferior de la ventana Detectors, en LOG podemos tener un seguimiento de lo que se está procesando internamente en el programa.

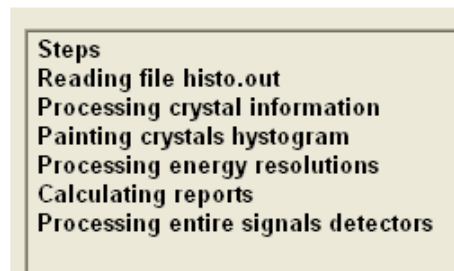


Fig 4.33.- Información de lo que se procesa en la aplicación.

NEW LUTS

Se activará una vez hayamos pulsado el botón Proceed with detector assessment. La función principal al pulsar el botón NEW LUTS es generar un nuevo fichero lut (ver descripción de LUT en el apartado 7.1.1.3 del presente documento), para ello hacemos uso de la función **INTERFAZLUT [12]**

La ventana que obtenemos es como la que mostramos a continuación:

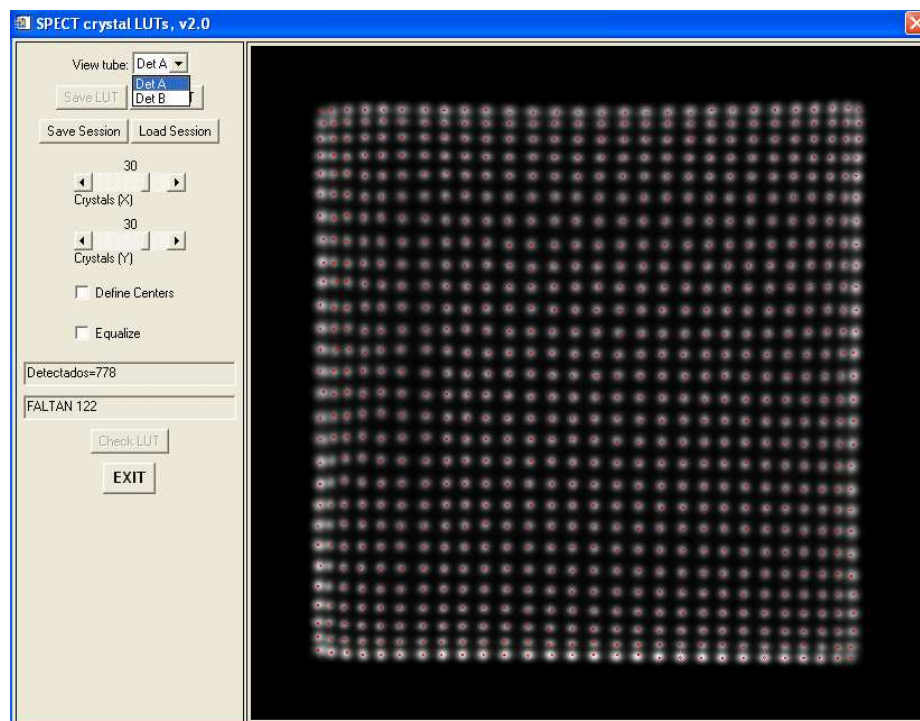


Fig 4.34.- Ventana para generar un nuevo fichero lut

La imagen que cargamos inicialmente es la imagen de llenado de campo actual,

Una vez abierta la imagen en la ventana se superpone una primera estimación de los centros, puntos rojos de la imagen. Estos puntos representan la posición donde llegan el mayor número de cuentas. En el interfaz se podrá ver la estimación de los centros para cada uno de los tubos de los que existiese información en el archivo .LIST seleccionado. Al modificar el valor de cada uno de los controles deslizantes de número de centros en X y en Y, se recalculan la posición de estos en función de la nueva información. Como se puede observar en las capturas, en los dos cuadros de texto de la aplicación se nos presenta en todo momento la situación del sistema, el número de centros detectados respecto a los esperados. Si éste es inadecuado, podemos añadir centros seleccionando la opción "Define Centers" y haciendo clic con el botón izquierdo en el punto en que queramos añadir un centro.

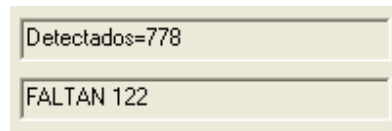


Fig 4.35.- Factor que nos indica que se han detectado 778 cristales, faltando por seleccionar 122 cristales .

El botón “Check LUT” está inhabilitado mientras exista un número inadecuado de centros detectados, es decir mientras FALTAN sea distinto de cero. Para ajustar manualmente los centros erróneos, se hace clic sobre el centro a eliminar con el botón derecho del ratón (siempre que la opción “Define Centres” esté activada). El botón izquierdo del ratón con la opción “**Define Centres**” activada, permite a su vez colocar un centro en la imagen con lo que es posible ajustar las posiciones manualmente.

Existe la posibilidad de ecualizar la imagen mostrada para facilitar la visualización de los máximos, seleccionando la opción “**Equalize**” del interfaz. Se obtiene en este caso una imagen como la que muestra la figura a continuación:

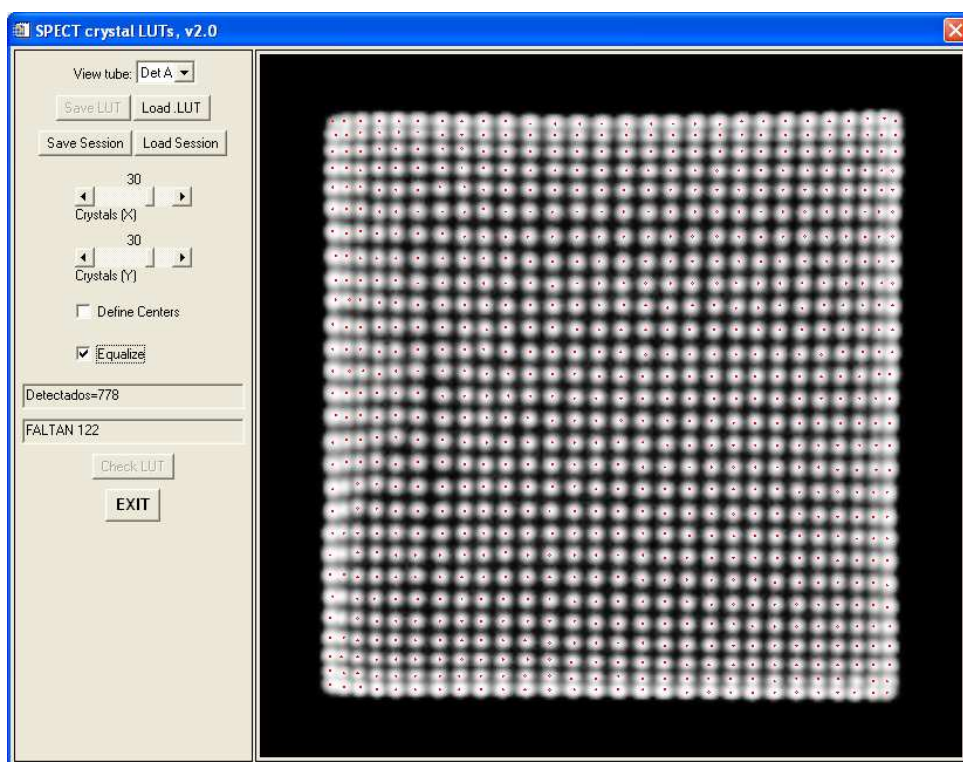


Fig 4.36.- Imagen con la ecualización activada

En cualquier momento pueden guardarse los máximos calculados, aunque no se hayan definido todos, para ello se puede hacer uso del botón “**Save Session**”, se abrirá un cuadro de diálogo donde se podrá seleccionar la dirección y la sesión se guardará con el nombre que se desee, no es necesario ponerle extensión alguna. A su vez, una sesión guardada se puede recuperar mediante el botón “**Load Session**”, que abrirá un nuevo cuadro de dialogo. Tendríamos que seleccionar la dirección donde fue almacena una sesión anterior.

Cuando se finaliza el proceso, la aplicación nos permite visualizar la lut generada, esto ocurre cuando los máximos colocados en la imagen de llenado de campo sobre la que estamos trabajando coinciden con el número de cristales esperado, ya que habilitamos automáticamente el botón “Check LUT”. Es además posible llegar a generar una nueva lut mediante el uso de unas LUT previas, estas pueden cargarse mediante el botón “**Load LUT**”. En este caso se abrirá un cuadro de diálogo en el que se irán pidiendo de uno en uno tantos ficheros de LUTs como tubos se hayan abierto. En esta situación (LUTs calculadas o cargadas mediante “Load LUT”) el botón “Check LUT” en la imagen de la izquierda podemos observar las zonas asignadas a cada cristal y la superposición de las fronteras de dichas zonas sobre el llenado de campo original, mientras que en la imagen de la derecha podemos observar el cálculo de LUT.

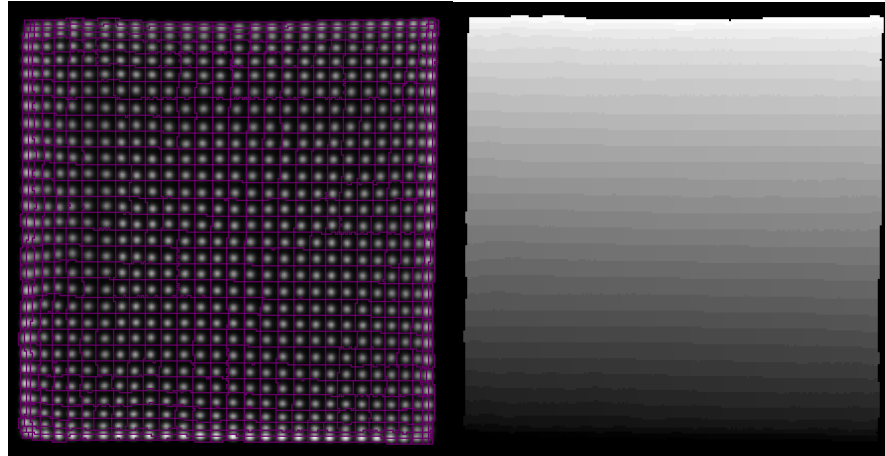


Fig 4.37 .- (izq) Imagen de llenado de campo ajustada a cristales, (drch) Imagen Lut.

En caso de que el programa no fuese capaz de asignar las zonas de manera adecuada, debido a una organización de los centros distinta a la supuesta (X filas e Y columnas) no aparecerán las ventanas anteriores, y se presentará una salida parecida a la siguiente, en la que se ha movido uno de los centros a la parte superior:

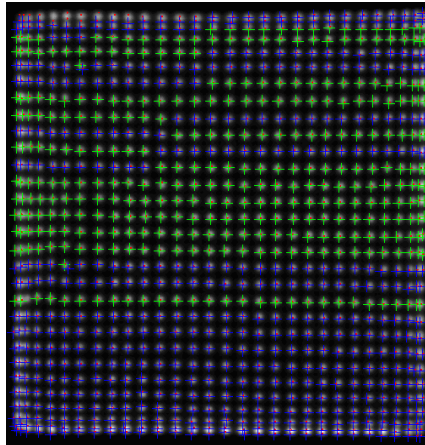


Fig 4.38.- Imagen que nos indica que el algoritmo ha fallado

En la ventana, se indica en color verde las filas que no tienen el número adecuado de cristales, de manera que, teniendo en cuenta que las filas van siendo detectando desde la parte inferior de la imagen, se puede ver cuál es la causa de que el algoritmo haya fallado. Una vez que el programa haya generado las LUTs de manera adecuada sin mostrar mensajes de error, tenemos que salvar una a una las LUTs pulsando el botón **“Save LUT”** para cada uno de los tubos que tengamos. Al hacerlo, nos aparece un cuadro de diálogo donde se nos pide introducir el nombre y el directorio donde guardar el archivo de salida:

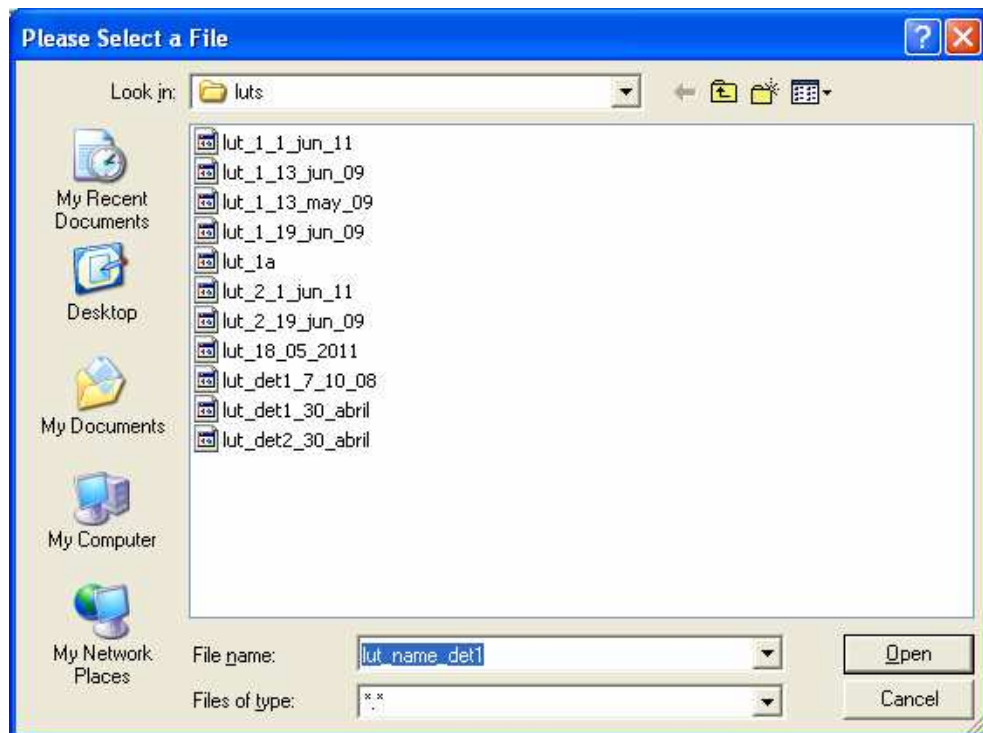


Fig 4.39.- Ventana al pulsar SAVE_LUT, se introduce un nombre sin extensión.

Una vez generados los nuevos ficheros lut, uno por detector, para salir de la aplicación pulsamos el botón **EXIT** y volvemos a la ventana principal figura 4.14. Es posible cargar las nuevas lut en la aplicación pulsando el botón **BROWSE** y seleccionando los dos ficheros lut correspondientes. Además se requiere pulsar el botón **Proceed with detectors assesment** para procesar los datos usando los nuevos ficheros lut generados.

(*) Para la generación de una nueva LUT el sistema FSPECT hace uso de implementaciones realizadas en el laboratorio LIM para anteriores sistemas.

UPDATE NEW LUT

Sólo estará activo cuando hayamos generado un nuevo fichero de calibración, botón NEWLUT.

Los pasos que seguimos al pulsar el botón UPDATE NEW LUT son los siguientes:

- 1.- Actualizar el fichero archives.txt (ver apartado 7.1.2.1) con los actuales nombres de los ficheros de calibración generados.
- 2.- Subir a la máquina Linux el actual archives.txt con los nuevos nombres del fichero lut generados. La ubicación dentro de la máquina será la que nos indica la tabla 9.6. Cuando se haya enviado correctamente el fichero archives.txt la aplicación nos lo informará con un mensaje como el que se muestra a continuación:



Fig 4.40.- Mensaje de haber enviado correctamente el fichero archives.txt

- 3.- Se envía a la máquina Linux los nuevos ficheros de calibración generados anteriormente con el botón NEW CRC, uno por detector. La ubicación de los mismos será la que nos indica la tabla 12.6.

Al igual que el punto 2, si el fichero ha sido enviado correctamente se notificará al usuario mediante el mensaje:



Fig 4.41.- Informa del envío correcto del fichero de calibración para el detector 1.

En caso contrario mostraremos un mensaje de error.



Fig 4.42.- Mensaje de error, indica que no se ha enviado correctamente el fichero lut

Finalmente la ventana con la corrección por uniformidad y picos de energía, sera tras todo el procesado algo como lo que se muestra en la siguiente figura:

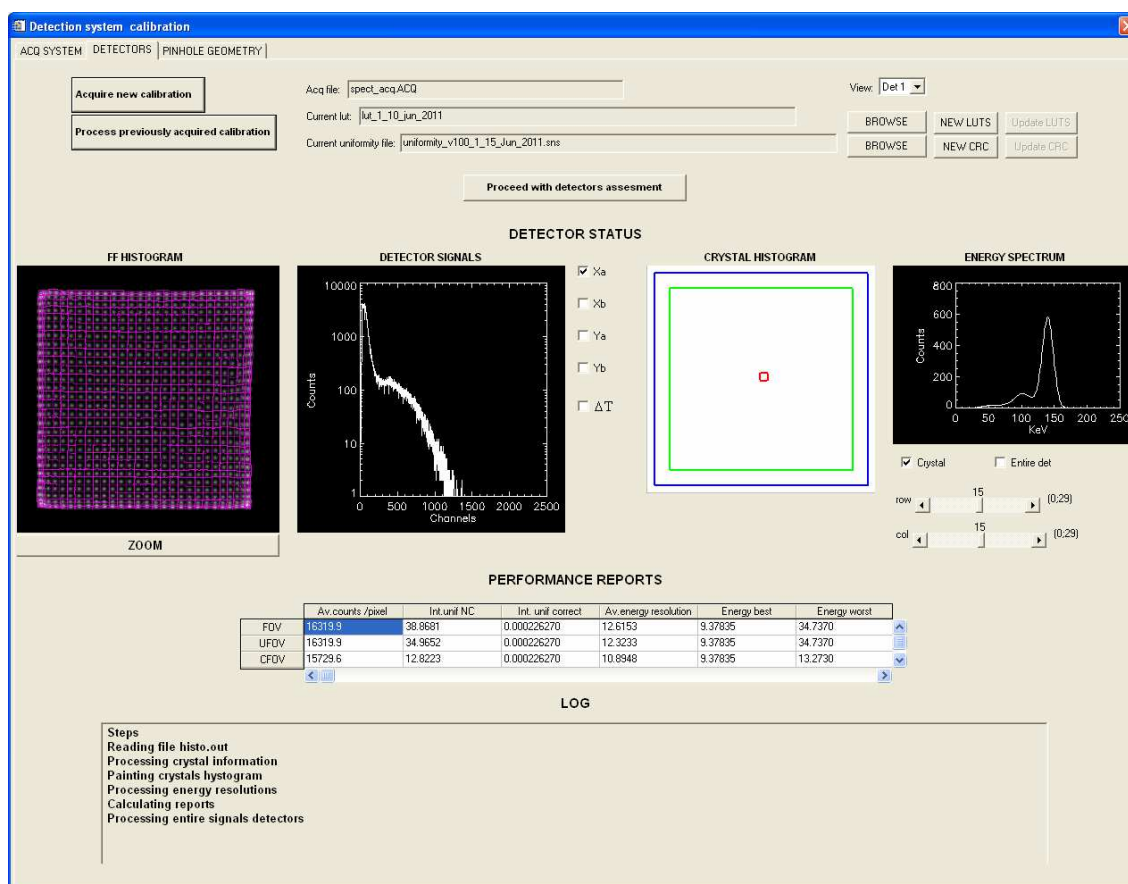


Fig 4.43.- Imagen corregida por uniformidad y con los máximos desplazados.

4.3.5 Implementación de la calibración para la corrección de no uniformidad y los picos de energía desalineados.

Se ha implementado en IDL las siguientes funciones:

Función implementada:

spect_gen_map_correction (image_det1, image_det2)

Esta función se encarga de generar los factores de uniformidad a partir de la imagen de llenado de campo bineada a 30x30x256.

Argumentos de entrada:

image_det1.- Corresponde a la imagen de llenado de campo del detector 1 de 256x256x256 que ha sido bineada a 30x30x256 utilizando para ello la lut asociada al detector 1.

image_det2.- Corresponde a la imagen de llenado de campo del detector 2 de 256x256x256 que ha sido bineada a 30x30x256 utilizando para ello la lut asociada al detector 2.

Argumentos de salida:

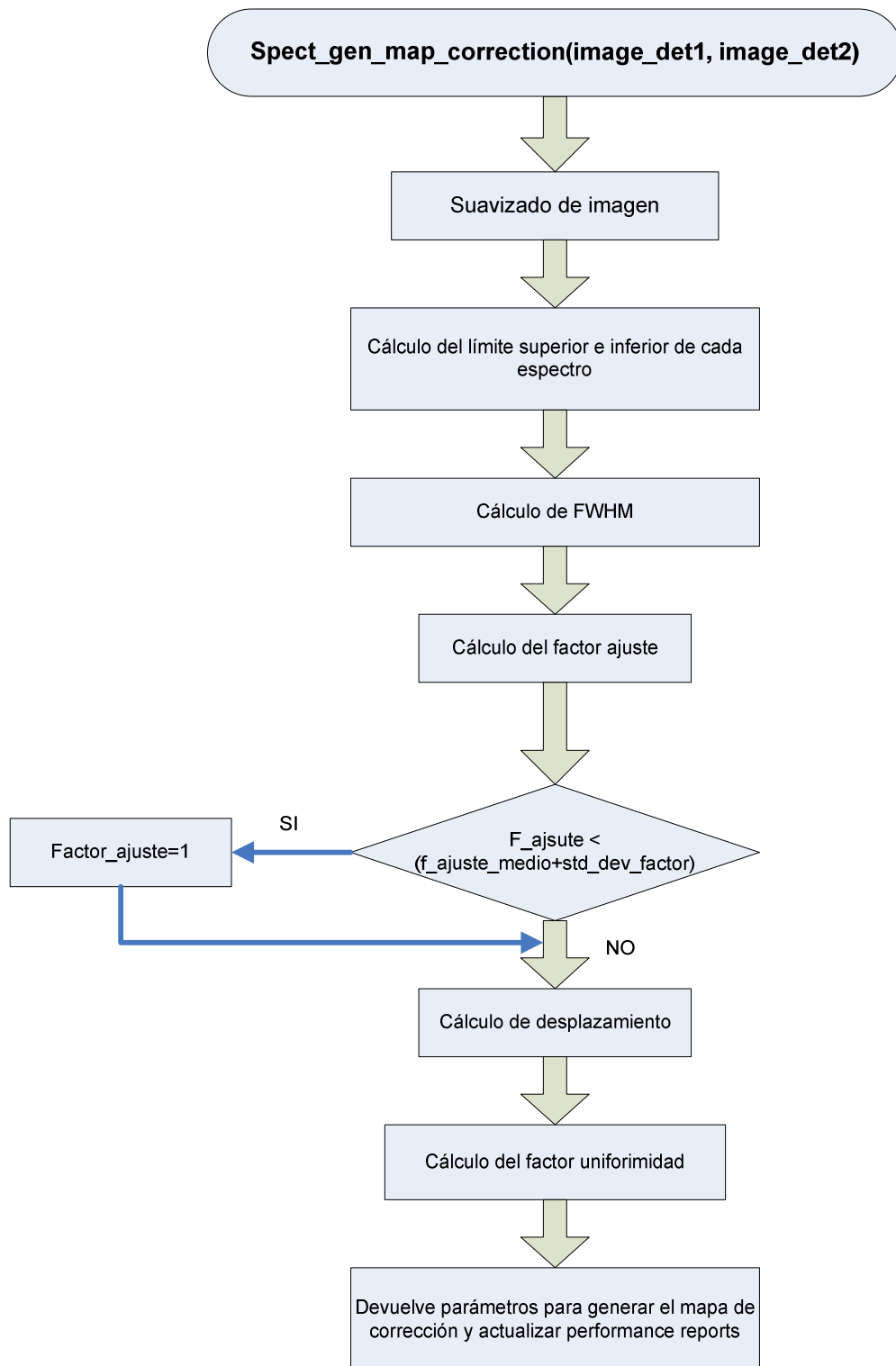
f_uniformidad.- Dato donde almacenamos el factor de uniformidad.

factor_ajuste.- Corresponde con el factor de ajuste calculado para cada espectro, necesario para pasar de canales a KeV.

desplazamiento.- Desplazamiento de cada espectro, calculado a partir de la posición máxima del espectro y el fotopico 140.

resul_fwhm.- Array que contiene los valores que se representamos en performance reports, entre ellos el FWHM de cada espectro.

Diagrama e flujo:



Función implementada

file_calibration (d, factor_ajuste , desplazamiento , f_uniformidad)

Función que se encarga de la escritura del fichero de calibración. Necesario para corregir la imagen por uniformidad.

Argumentos de entrada

d.- Se corresponde con el detector.

factor_ajuste.- Factor de ajuste para pasar cada espectro de energía de canales a KeV.

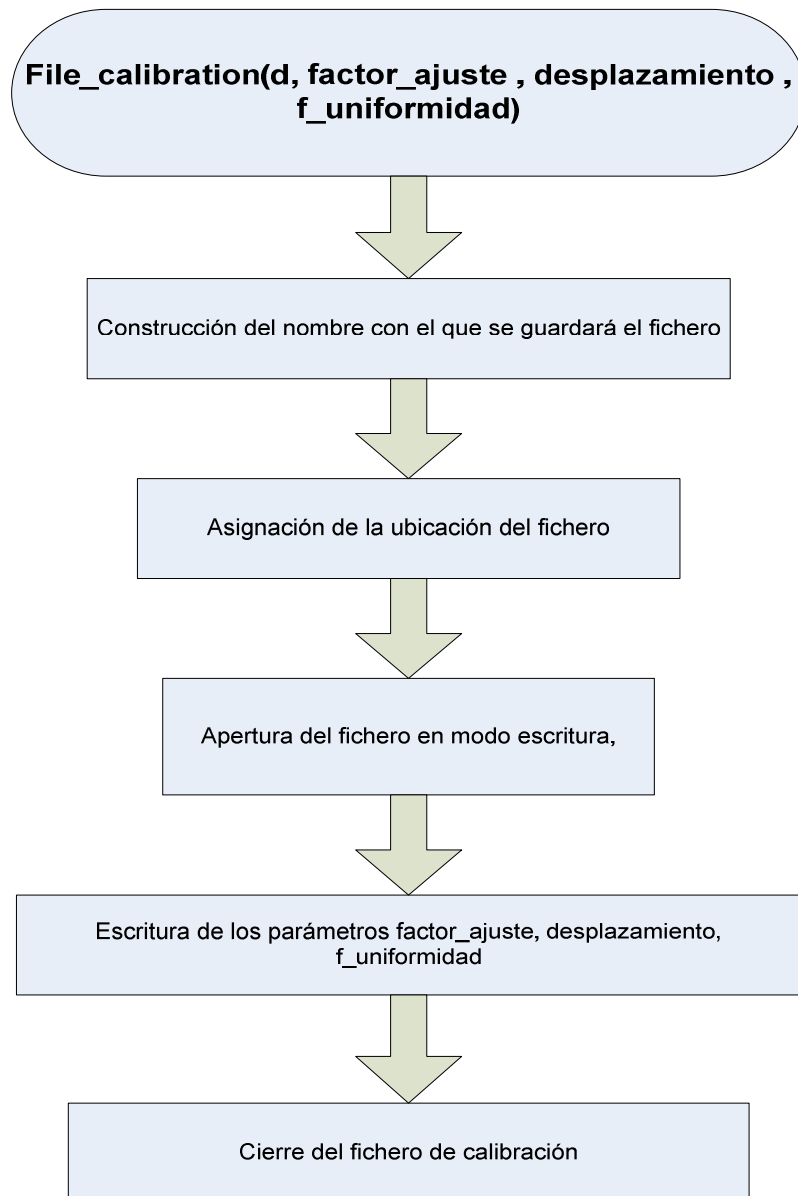
desplazamiento.- Valor que debe desplazarse cada espectro para quedar alineado a la posición del máximo del fotopico de estudio.

f_uniformidad.- Corresponde a los valores de uniformidad.

Argumentos de salida

Parámetro de confirmación.

Diagrama e flujo:



Función implementada:

spect_gen_image_corrected (d,ven, image_det, cadena_uniformity, photopeak)

Función que aplica el fichero de calibración por uniformidad a la imagen de llenado de campo de cada detector.

Argumentos de entrada:

d.- Equivale a cada detector.

ven.- Variable propia de la aplicación para identificar si la función ha sido llamada desde la calibración o desde la reconstrucción.

image_det.-Corresponde a la imagen de llenado de campo de dimensión 30x30x256.

cadena_uniformity.-Corresponde con el nombre del fichero de calibración o uniformidad que se aplicará a la imagen de llenado de campo.

photopeak.- Canal máximo del fotopico.

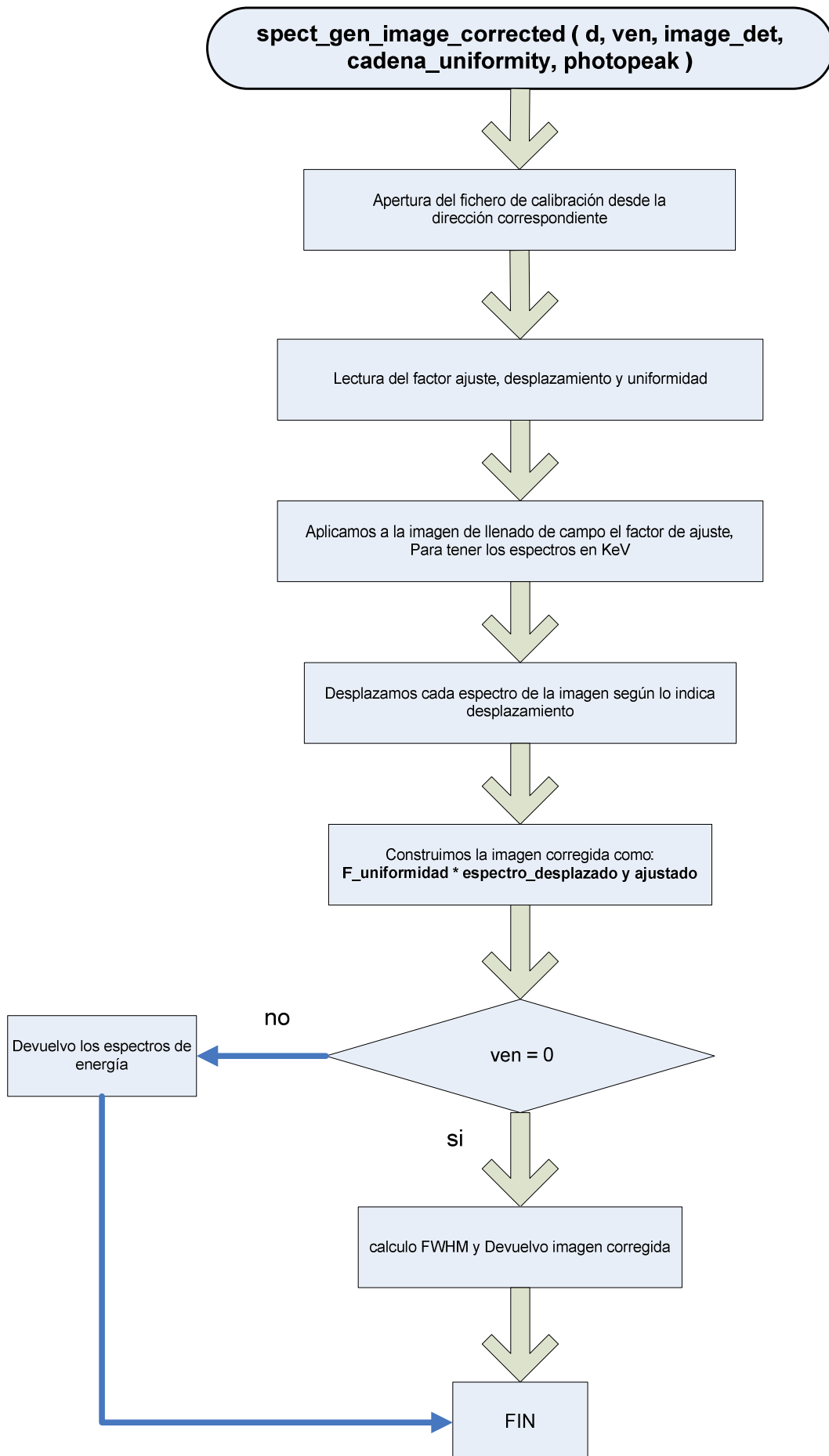
Argumentos de salida:

img_corregida_uniformidad.-Si ven=0 indica que la función ha sido llamada desde la aplicación de calibración, nos devuelve una imagen corregida por uniformidad, es decir una imagen uniforme con los espectros de energía escalados, ajustados a KeV y alineados.

resul_fwhm.-Si ven = 0 calculamos el FWHM asociado a cada espectro y devolvemos los valores máximos y mínimos para cada campo de visión.

espectros_detector.-Si ven=1 indica que la función ha sido llamada desde la aplicación de reconstrucción, por tanto no es necesario calcular el FWHM asociado a cada espectro y devolvemos los espectros de energía.

Diagrama de flujo



4.4 PINHOLE GEOMETRY

Los desalineamientos entre detectores y los de los propios detectores con el centro de rotación, se corrigen en un tercer proceso de calibración en el cual los detectores se equipan con colimadores pinhole. Ver descripción sobre la corrección en 3.2.1

4.4 1 Explicación teórica

La corrección por pinhole geometry consiste en la adquisición de datos utilizando un phantom de calibración relleno de ^{99m}Tc como el mostrado en la figura 4.44.



Fig 4.44.- Maniquí de calibración para geometry pinhole

Los datos adquiridos se procesan para estimar lo que difiere la colocación del detector con respecto a lo ideal, utilizando para ello el algoritmo de Beque [13]. Finalmente la aplicación genera una matriz que es utilizada por el algoritmo de reconstrucción OSEM3D implementado para el sistema, que incluyen ya las correcciones calculadas en este paso de calibrado.

Para llevar a cabo el proceso de calibración, se requiere la interacción del usuario en una serie de pasos que se explicarán a continuación.

4.4.2 Modulo de comunicación

Pinhole geometry hace uso de la llamada a los programas **PinholeCalibration.exe** y **MatrixGenerationPinhole.exe** [17]. El procesado llevado a cabo por esta aplicación se muestra en la siguiente figura.

En la aplicación Pinhole Geometry inicialmente el usuario realizará una adquisición de datos siguiendo las instrucciones que la aplicación le ira dando (ver *Acquire new calibration pinhole* del presente apartado).

En la interfaz presentada, el sistema es capaz de actualizar la pantalla representando las proyecciones adquiridas, permite interacción con el usuario para el ajuste fino de parámetros que serán explicados en apartados subsecuentes y en su caso realiza las correspondientes llamadas a **PinholeCalibration.exe** y **MatrixGenerationPinhole.exe** con los parámetros adecuados (ver tabla 10 y 11 del presente documento). Como resultado de este proceso de calibración obtendremos una matriz que incluye la corrección de alineamientos de los detectores y que se utilizara en la aplicación de reconstrucción.

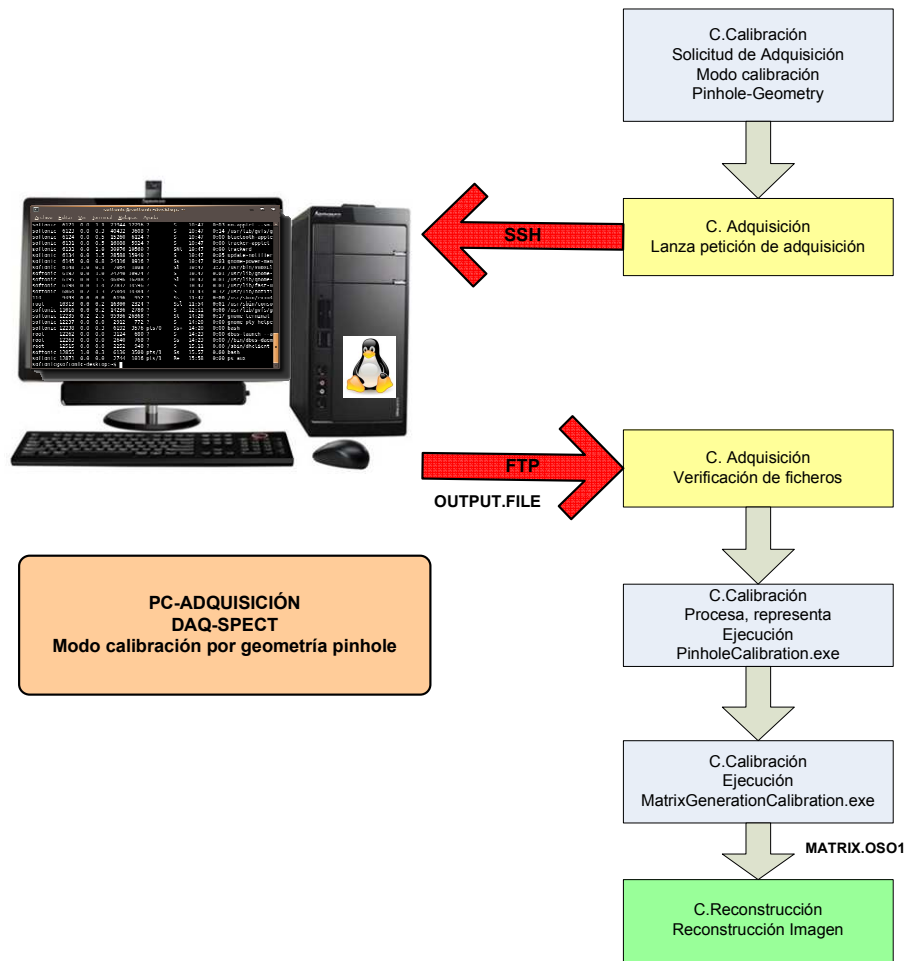


Fig 4.45.- Protocolo de comunicación en PINHOLE GEOMETRY

4.4.3 Ficheros de entrada y salida

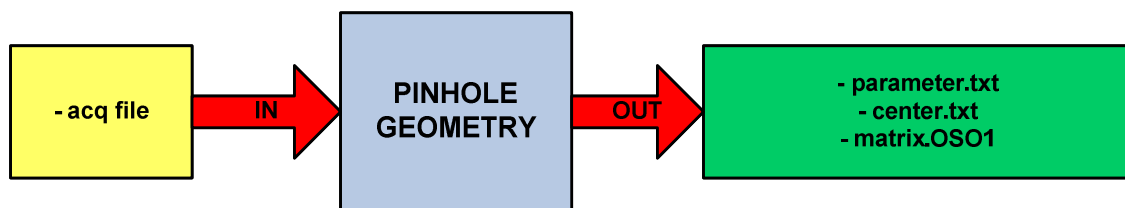


Fig 4.46.- Ficheros de entrada y salida en PINHOLE GEOMETRY

En la figura podemos ver que PINHOLE GEOMETRY hace utiliza como entrada el fichero acq. generado por el software de adquisición ubicado en Linux. Los ficheros de salida generados por la aplicación parameter.txt, center.txt (archivos intermedios que usa la aplicación) y matriz.OSO1 ver descripción en la tabla 10-11.

4.4.4 Desarrollo del software de calibración por pinhole geometry

Al seleccionar la pestaña PINHOLE GEOMETRY se mostrará una pantalla como la que se muestra a continuación:

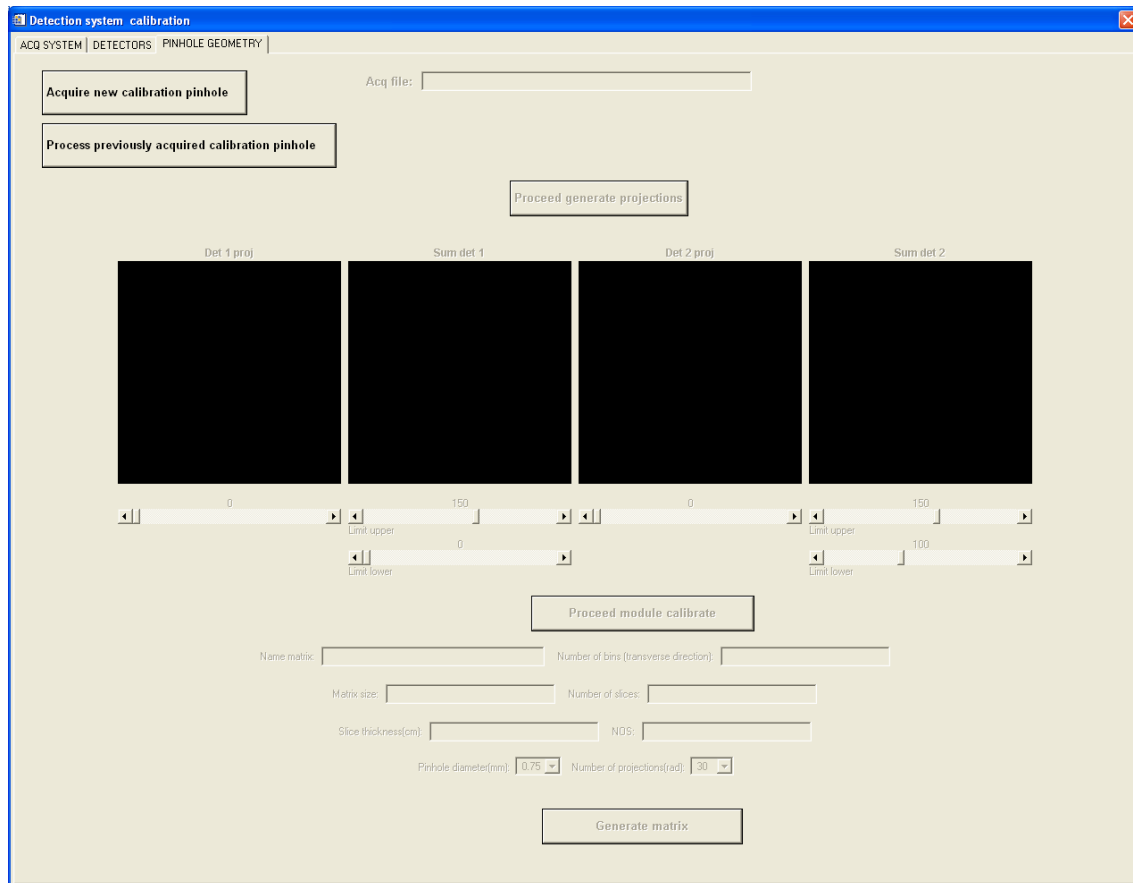


Fig 4.47.- Ventana principal de la calibración modo Pinhole Geometry.

Inicialmente estarán activos los botones *Acquire new calibration pinhole* y *Process previously acquired calibration*.

- Botón *Acquire new calibration pinhole*.-Realiza una nueva adquisición de datos, es necesario colocar el colimador pinhole para el estudio y el fantoma mostrado en la figura 4.44.
- Botón *Process previously acquired calibration*.-Procesa una adquisición previamente almacenada.

Sí deseamos realizar una nueva adquisición, como en el caso de la calibración para los detectores explicada en el apartado anterior, es necesario seguir las instrucciones que dará la pantalla que se muestra al usuario:

Acquire new calibration pinhole

PINHOLE GEOMETRY

INSTRUCTIONS:

1. Fill the calibration phantom with the corresponding isotope and attach it to the calibration bed.
2. Attach the calibration bed to the system.

Bed detected:

☐ Mouse
 ☐ Rat
 ☒ Cal
 ☐ None

Collimators detected:

☒ Pinhole
 ☐ Parallel
 ☐ None

3. Select ROR and study duration.

ROR [mm]:

Study duration [min]:

Study name:

4. Press <START> to launch the acquisition.

Acquisition estimated duration: 0:00 mins.

Acquisition Time left: 0:00 mins.

Elapsed time (s):	0	Current frame:	1
Count rate (cps):	0.000000	Projection:	1
Current bed position:	1	Angular position:	1

Press <ABORT> to cancel the Acquisition and DISCARD the data.

Fig 4.48 .- Ventana de adquisición modo pinhole geometry.

Descripción de las instrucciones para adquirir en modo Pinhole:

1.-Nos recuerda que debemos rellenar el phantom de calibración con el isótopo correspondiente y colocarlo en la cama de calibración.

2.-Colocación del tipo de cama y colimador para realizar la correspondiente prueba de calibración. Es necesario seleccionar un **tipo de cama en modo calibración** y **colimadores pinhole** ya que en caso contrario la instrucción 3 permanecerá bloqueada a espera de la colocación de cama y colimador adecuadas.

3.-La tercera instrucción nos solicita la inserción de tres parámetros, por una parte la selección del ROR (radio de rotación), el tiempo de estudio y nombre específico del estudio, este nombre es el que se asignará al fichero con extensión .ACQ. Esta calibración se debe hacer para cada uno de los radios de rotación con los que puede funcionar el aparato (3 distintos) y así obtener una matriz distinta para cada una de esas situaciones.

4.-Finalmente se activa el botón **Start** cuando todos los datos solicitados en los pasos anteriores son correctos. Al pulsarlo se lanza la adquisición de los datos de calibración. Podemos ver el estado de comunicación en el que nos encontramos con la máquina Linux mediante los datos que se actualizan en la parte inferior de la pantalla (figura 4.49).

Acquisition estimated duration: 0:00 mins. Acquisition Time left: 0:00 mins.			
Elapsed time (s):	0	Current frame:	1
Count rate (cps):	0.000000	Projection:	1
Current bed position:	1	Angular position:	1

Fig 4.49.- Zona informativa del estado de adquisición con la máquina FSPECT

Los campos informativos son los anteriormente comentados en la calibración de los elementos detectores.

- Elapsed time (sec).- Indica el tiempo transcurrido de la adquisición medido en segundos.
- Count rate.- Tasa de conteo instantáneo, es decir número de cuentas por segundos.
- Current bed position.- Número de posición de la cama actual.
- Current frame.- Número de frame o cuadro actual.
- Projection.- Número absoluto de la proyección.
- Angular position.- Posición angular en la que se encuentra el anillo.

Cuando finaliza la adquisición y todo es correcto, la aplicación encargada de la adquisición generara los archivos de entrada al software de calibración. Al finalizar la adquisición los ficheros se almacenan en la ruta destino que nos indica la tabla 9.7 Una vez elegida o realizada la adquisición según sea el caso, la aplicación comprueba el path devuelto o seleccionado. Realiza la lectura del fichero.ACQ correspondiente y carga en la aplicación los datos adecuados. Posteriormente cuando todo sea correcto activa el botón proceed generate projections.

Proceed generate projections

Este botón se encarga de llamar a una función que genera las proyecciones de la imagen calibradas por uniformidad y con los picos máximos de energía centrados en el valor del fotopico máximo del isótopo 99mTc.

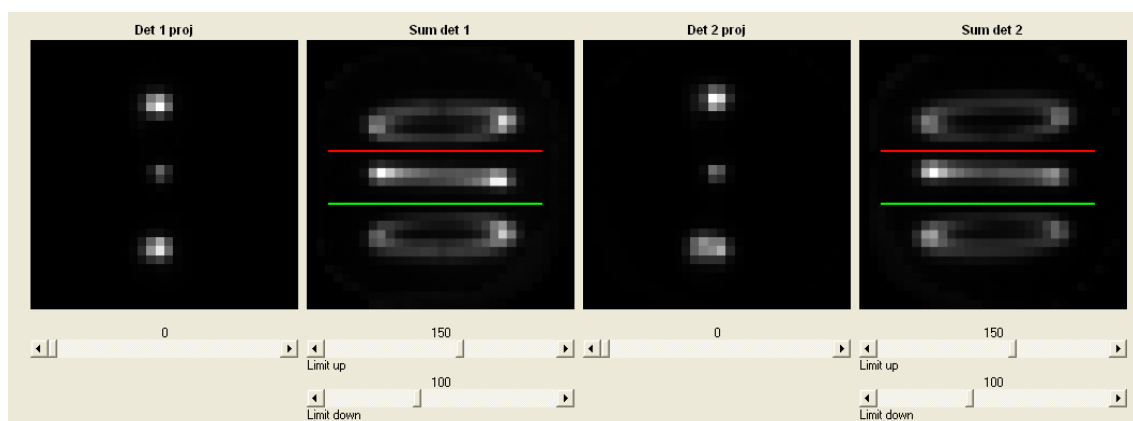


Fig 4.50.- Imagen con las proyecciones calibradas.

Det 1 proj y Det 2 proj muestran las proyecciones de la imagen de cada detector calibradas por uniformidad. Sum det 1 y sum det 2 es la suma total de las proyecciones para el eje z (dimensión angular en este caso). Las líneas de color rojo y verde corresponden al limit up y limit down que se utilizan para marcar un límite de separación entre los píxeles superiores y centro e inferiores y centro respectivamente ver (fig 4.50).

Limit down.- La posición de esta línea es calculada internamente por el sistema e indican la fila en la proyección en la cual no hay solapamiento entre los píxeles inferiores y centrales. Mediante la barra slider de limit down podemos desplazar la línea hacia arriba o abajo en caso de necesitarlo.

Limit up.- La posición de esta línea es calculada internamente por el sistema e indican la fila en la proyección en la cual no hay solapamiento entre los píxeles inferiores y centrales. Mediante la barra slider de limit up podemos desplazar la línea hacia arriba o abajo en caso de necesitarlo.

Proceed module calibrate

Esté botón arranca la ejecución del programa **PinholeCalibration.exe [17]** programa que nos devuelve ficheros que contienen datos de corrección para pinhole y ficheros necesarios para generar una matriz que utiliza el sistema para la reconstrucción de la imagen. PinholeCalibration.exe requiere de una serie de serie de parámetros descritos en la tabla 10.

Parámetros de entrada:

Fichero_proj,,Nangles, Parameter_out, Gauss_size, Distance_12, Distance_23, Distance_13, H_ph_init, H_ph_iter, R_proj_init, R_proj_iter, Tilt_init, Tilt_iter, Twist_init, Twist_iter, Eu_init, Eu_iter, Ev_init, Ev_iter, M_init, M_iter, Center_out

Parámetros de salida:

Error file, Parameter_out, Center_out

Ejemplo de llamada de PinholeCalibration.exe, orden de los parámetros de entrada

PinholeCalibration.exe FICHERO_PROJ Nbins Nangles tbin Parameter_out Gauss_size Distance_12 Distance_23 Distance_13 Limit_down Limit_up H_ph_init H_ph_iter R_proj_init R_proj_iter Tilt_init Tilt_iter Twist_init Twist_iter Eu_init Eu_iter Ev_init Ev_iter m_init m_iter Center_out

Ejemplo de llamada real

PinholeCalibration.exe C:\last\SPECT\OSEM_SPECT\COLLIMATOR_PINHOLE\IMAGES\rotate_1.img 30 60.000000 0.16 C:\last\SPECT\OSEM_SPECT\COLLIMATOR_PINHOLE\IMAGES\parameter_1.txt 5 21 21 16 11.7647 17.6471 42 1 33.150000 1 0.1 1 0.1 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 C:\last\SPECT\OSEM_SPECT\COLLIMATOR_PINHOLE\IMAGES\center_1.txt

Generate Matrix

Una vez haya finalizado la ejecución del programa PinholeCalibration.exe, la aplicación actualiza la pantalla y arranca la ejecución del programa **MatrixGenerationPinhole.exe [17]**, Esta aplicación se encarga de generar la matriz incluyendo la corrección de alineamiento de los detectores. Alguno de los datos necesarios para la construcción de la matriz se indican en la propia interfaz, ver figura 4.51:

The screenshot shows the 'MatrixGenerationPinhole.exe' interface with the following fields and values:

- Name matrix: matrix0_11_Jul_2011/matrix1_11_Jul_2011
- Number of bins (transverse direction): 30
- Matrix size: 80
- Number of slices: 40
- Slice thickness(cm): 8.00
- NOS: 1
- Pinhole diameter(mm): 0.075
- Number of projections(rad): 60

Fig 4.51 .- Parámetros que se incluyen en la creación de la matriz.

Name matrix.-Nombre de los ficheros que contienen los resultados de la matriz, para cada detector. Campo que no será editable para el usuario, la aplicación genera uno por defecto

Number of bins.- Indica el número de cristal.

Matrix size .- Píxeles utilizados para la reconstrucción.

Number of slices.- Número de rodajas.

Slice thickness.- Espesor de la rodaja.

Nos.- Número de subconjuntos. Fijado a 1 para colimadores pinhole.

Pinhole diameter.- Diámetro del colimador pinhole.

Number of projections.-Número de proyecciones.

Además de los parámetros mostrados por pantalla es necesario incluir otros parámetros, consultar descripción en la tabla 11, como son:

Parámetros de entrada:

Nom_fitxer, d_ph, Nfil, Tpix, Tpix_z, Ntall, Nbins, Ntalls_b, Tbin, Nangles, NOS, Increment, Fitxer_mapa_ate, R_proj, Hph, Mph, Twist, Eu, Ev, Tilt,

Parámetros de salida

Matriz, File_error

Ejemplo de llamada de MatrixGenerationPinhole.exe, orden de los parámetros de entrada

MatrixGenerationPinhole.exe nom_fitxer d_ph Nfil tpix tpix_z Ntalls Nbins Ntalls_b Tbin Nangles NOS increment fitxer_mapa_ate R_proj Hph Mph Twist Eu Ev Tilt

Ejemplo de llamada real

MatrixGenerationPinhole.exe

C:\last\SPECT\OSEM_SPECT\COLLIMATOR_PINHOLE\PROGRAMS\MatrixGenerationPinhole.exe

C:\last\SPECT\OSEM_SPECT\COLLIMATOR_PINHOLE\MATRIX\matrix.OS01 0.0750000 80 0.400000

0.800000 40 30 30 0.160000 60 1 6 no 3.31500 4.20000 0 0 0 0

Al finalizar la aplicación, ésta nos devuelve un fichero que contiene la matriz necesaria para la reconstrucción de la imagen utilizando un algoritmo de tipo 3D-OSEM.

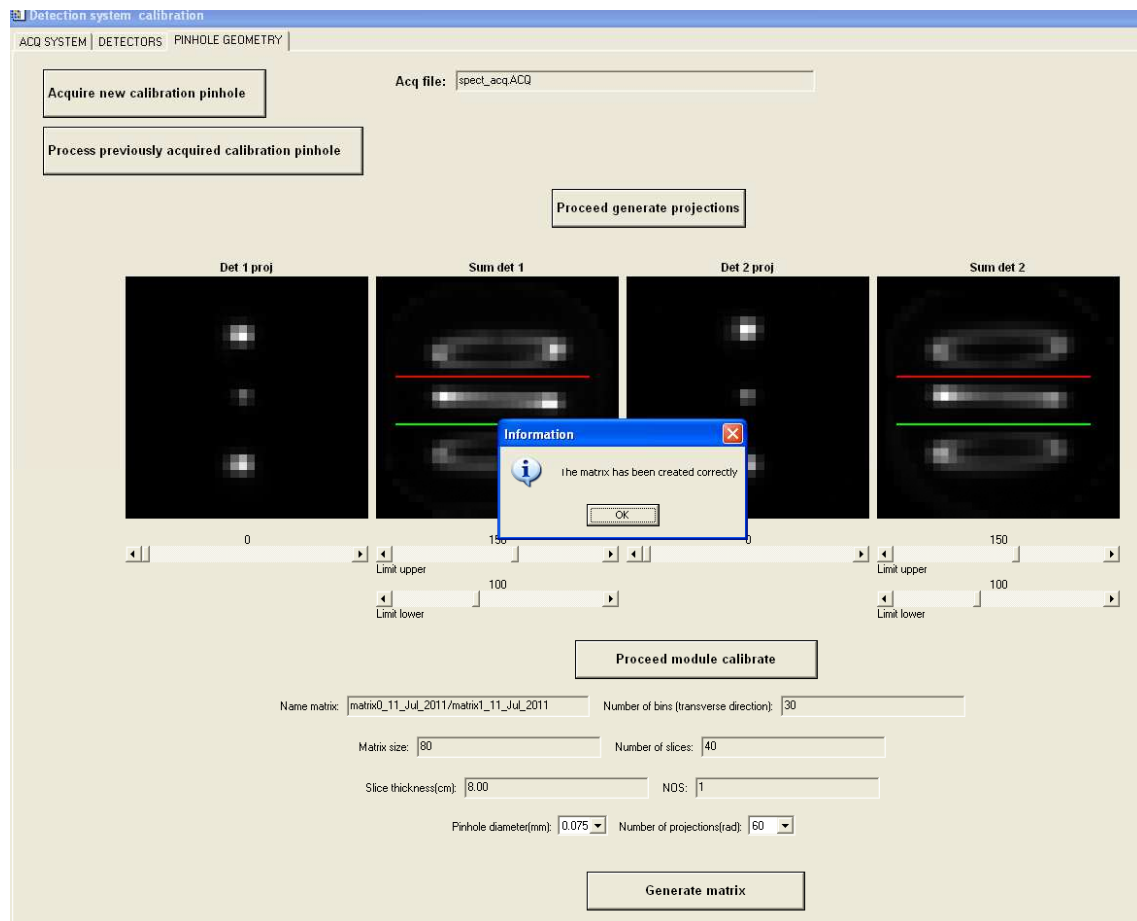


Fig 4.52.- Imagen final que obtenemos al realizar la calibración Pinhole Geometry.

4.4. Implementación de la calibración para la corrección pinhole

Se hace uso de la propia interfaz de la aplicación para llamar a los programas de ejecución.

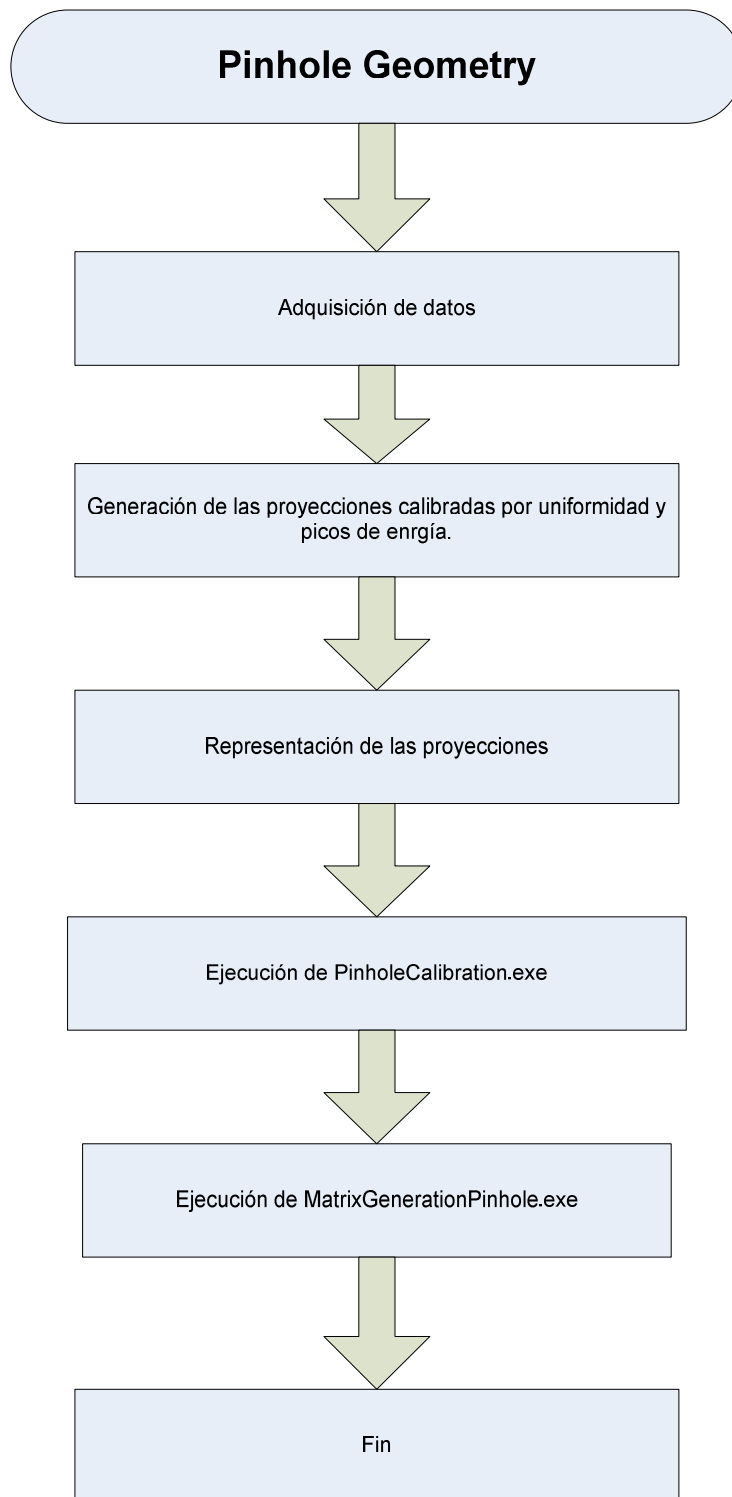
Parámetros de entrada:

Fichero con las proyecciones corregidas por uniformidad y picos de energía.
Ficheros de adquisición.

Parámetros de salida:

Parameter.txt.- Resultados con los alineamientos del detector.
Center.txt.- Fichero que contiene la posición del centro de los puntos de las proyecciones.
Matriz.OS01.- Matriz con los datos necesarios para reconstruir la imagen.

Diagrama de flujo:



5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado la interfaz de calibración para el sistema FSPECT.
- La interfaz de calibración desarrollada es un software sencillo y manejable para todo tipo de usuario.
- Se ha definido los protocolos de calibración necesarios para realizar el control de calidad del aparato y calibrarlo en caso de ser necesario.
- Se ha implementado la versión inicial del software y se ha validado utilizando para ello datos de calibración de la máquina previa y datos sintéticos.
- El presente PFC es presentado en el Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica. 2011. Cáceres y da lugar a una publicación científica.[23]

5.2 LÍNEAS FUTURAS

- Integración de los distintos componentes de la máquina FSPECT (hardware y software).
- Realizar pruebas conjuntas del sistema FSPECT para validar los protocolos de calibración definidos
- Mejorar el tiempo de procesamiento de algunas de las utilidades implementadas.
- Hacer las pruebas con el sistema completo una vez este disponible la versión final del mismo.

6. DIAGRAMA DE GANTT Y PRESUPUESTO

A continuación se realiza un estudio estimado de lo que podría ser el presupuesto del proyecto, relacionado con la parte de calibración.

6.1 PRESUPUESTO DEL SOFTWARE DE CALIBRACIÓN DENTRO DEL LIM.

Tarea	Costes / Semana (euros)	Semanas	Total
Documentación preliminar e instalación de programas	500 €	1	500
Desarrollo de la versión dummy de calibración	500 €	10	5000 €
Desarrollo de la versión release de calibración	500 €	9	4500 €
Pruebas del software	500 €	1	500 €
Redacción del manual/proyecto	500 €	4	2000 €
Ordenador amortizado	100 €	-	100 €
Gastos varios (mantenimiento, internet)	100,00 €	25	2500 €
IVA(18) %	-	25	2844 €
Total estimado			17944 €

Tabla 12.- Presupuesto estimado del proyecto

6.2 DIAGRAMA DE GANT Y ESTIMACIÓN TEMPORAL.

Tarea Principal	Subtareas asociadas	Estimación económica	Responsable	Responsable personal	Estimación temporal	Descripción
1.-SOFTWARE CALIBRACIÓN						
	1.- Documentación e instalación de programas	1 ingeniero / 1 semana	HGUGM	Gabriela	1 semana	En este periodo de tiempo se pretende que el trabajador instale todos los software necesarios, y realice un estudio previo de lo que se lleva hasta el momento
	2- Versión "dummy" del interfaz de calibración	1 ingeniero / 10 semanas	HGUGM/IDIBAPS	Eduardo/Gabriela /IDIBAPS	10 semanas	Adaptar el software de calibración de la máquina original para funcionar con detectores con 4 señales de posición en vez de 16. Incluir algoritmo de calibración geométrica descrito por Beque para colimadores pinhole.
	3- Versión release del interfaz de calibración	1 Ingeniero / 9 semanas	HGUGM	Eduardo/ Gabriela	9 semanas	Comprobar la funcionalidad del software con datos reales. Hay que obtener una versión que sea integrable en la consola de usuario de la máquina. Además se debe incluir el protocolo de calibración geométrica indicado en el punto 6.5 y modificar los algoritmos de reconstrucción analíticos para la nueva máquina.

	4.- Pruebas del software	1 Ingeniero / 1 semanas	HGUGM	Eduardo/ Gabriela/Aurora	1 semanas	En este periodo se realizan las pruebas de integración con la adquisición y reconstrucción.
	5.- Documentación Interfaz de calibración	1 Ingeniero / 15 semanas / Paralelo	SEDECAL/HGUGM	Gabriela /SEDECAL	4 semanas	Generar la documentación necesaria para la utilización del software por parte de SEDECAL. Añadir al Manual de Usuario la documentación oportuna por parte de SEDECAL. El trabajo se irá realizando desde las primeras semanas y se añade un tiempo más para adaptarlo al PFC

Tabla 13.-Diagrama de Gant.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25
HGUGM	T1																								
HGUGM		TAREA 2																							
HGUGM												TAREA 3													
HGUGM																					T 4				
HGUGM/SEDECAL																						TAREA 5			

Tabla 14.- Periodo de tareas.

7. ANEXO

7.1 FICHERO DE ENTRADA Y SALIDA

La aplicación hará uso de los siguientes ficheros de entrada y generará al usuario los siguientes ficheros de salida, a continuación un esquema general:

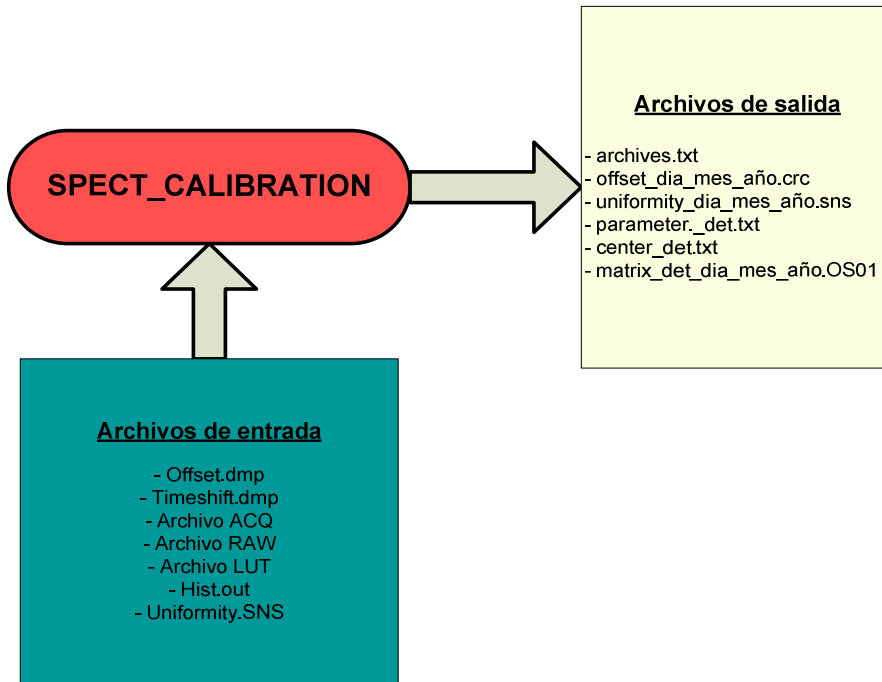


Fig 7.1.- Esquema de ficheros de entrada y salida

7.1.1 Ficheros de entrada

7.1.1.1 Formato de los archivos “.ACQ”

```
spect_acq
vie jun 19 17:47:34 CEST 2009
[acquisition]
    calibration_study=1
    gen_projections=0
    projections=1
    time_per_proj=600
    fixed_spin_angle=1
    slices_overlap=4
    bed_positions=1
    init_bed_pos=0.0
    init_detector_pos=-46.0
    timed_frames=1
    num_files=1
    total_time=600
    base_filename="spect_acq"
    pixel_size_y=1
    pixel_size_z=1
    a=15.50
    b=15.50

[calibration]
    collimator=0
    tube_model=1
    energy_channels=256
    num_detectors=2
    det1=1
    det2=2
    det3=-
    det4=-
    matrix_size=256
    num_xtals=30
    angle_btwn_detectors=180
    file_offsets=offsets_320_9_6_2009.crc
    file_uniformity=uniformity_v20_d1__19_jun_2009.sns,uniformity_v20_d2__19_jun_2009.sns,
    file_alignments=alignment_d12__5_3_2009.cor
    file_LUTs=lut_1_19_jun_09,lut_2_19_jun_09,

[isotope]
    isotope_name=Tc99m
    photopeak=140
    halflife=21600

[log]
    SPECT acquisition finished OK
```

Tabla 2 .- Fichero ACQ

El fichero .ACQ se genera una vez acaba o se finaliza voluntariamente la adquisición de datos, en el directorio reservado para la generación de ficheros en la máquina Linux (directorio CURRENT colgando de donde se ejecute el programa de adquisición). Este fichero contiene toda la información necesaria para localizar los archivos que se utilizaron y se generaron en la adquisición. Las secciones en que se subdivide el fichero son: cabecera, [acquisition], [calibration], [isotope] y [log]. A continuación se detalla el contenido de los parámetros presentes en cada una de ellas:

[cabecera]

NOMBRE _ ADQUISICIÓN es el nombre dado por el usuario a todo el estudio, y va seguido de la fecha y hora de realización del estudio.

[acquisition]

gen_projections.- Indica si, además del fichero/s ".slt", se han generado las proyecciones individuales en formato ".raw" al realizar la adquisición.

projections.- Número de posiciones angulares que va a tomar el detector al hacer una barrido completo.

time_per_projection.- Tiempo de adquisición asignado a cada proyección expresado en segundos.

fixed_spin_angle.- Recorrido angular cubierto por un barrido completo, expresado en grados.

slices_overlap.- Número de rodajas (de grosor igual a la mitad de un cristal del detector) que se solapan entre posiciones de cama consecutivas.

bed_positions.- Número de posiciones de cama exploradas en el estudio. Cada posición de cama dará lugar a un archivo .slt diferente.

Init_bed_pos.- Posición inicial de la cama cuando se comenzó la adquisición. Este número representa la distancia en mm desde la posición de home.

timed_frames.- Número de sectores temporales (frames) en que se divide la adquisición (>1 en un estudio dinámico, = 1 en uno no dinámico). Para cada uno de estos sectores temporales se genera un fichero .slt independiente.

Time_per_frame.- Tiempo en segundos asignado a cada frame.

num_files.- El número de ficheros .slt que componen el estudio completo. Solo se cuentan en este campo los que han sido correctamente generados.

total_time.- Duración total del estudio en segundos.

base_filename.- Afijo (entrecomillado) que determina los nombres de todos los ficheros .slt generados, residentes en el mismo directorio que el fichero .ACQ, y cuyos nombres serán base_filename_N_M.slt donde N codifica la bed_position y varía entre 1 y bed_positions, y M codifica el frame y varía entre 1 y timed_frames.

[calibration]

Collimator.- Nos indica si hay o no colimador, cuando es 0 no hay colimador, 1 existe colimador.

tube_model=1

energy_channels.- Canales de energía relacionados.

num_detectors.- Número de detectores en la máquina FSPECT

det1.- Nombre que se asigna al primer detector.

det2.- Nombre del Segundo detector.

det3.- No existe detector 3

det4.- No existe detector 4

matrix_size.- Tamaño de la matriz

num_xtals.- Número de cristales

angle_btwn_detectors=180.-Valor que indica el ángulo inicial de la pareja de tubos 1-2, en grados.ángulo de rotación entre los detectores.

file_offsets .- Fichero de offsets utilizado (ya aplicado) en la generación del modo .LIST, disponible sólo con fines de depuración de errores.

file_uniformity.- Nombre de los ficheros de calibración relacionados en la adquisición

file_alignments.- Archivo donde se almacenan los desalineamientos de los detectores respecto de su posición ideal en el plano YZ según su propio sistema de referencia.

file_LUTs.- Vector donde se especifican entrecomillados los nombres de los ficheros de asignación de cristales correspondientes a cada uno de los tubos detectores.

[isotope]

isotope_name.- Nombre en ASCII entrecomillado que identifica el isótopo usado, mediante la concatenación de su abreviatura estándar seguida de su número másico.

Photopeak.- Valor del canal de energía del fotopico característico del isótopo utilizado.

Halflife.- Vida media del isótopo utilizado expresada en segundos.

[log]

-"SPECT acquisition finished OK." Por no haberse producido ninguna incidencia durante la adquisición.

7.1.1.2 Formato de los archivos ".RAW"

Los archivos ".raw" contienen únicamente los datos de una proyección. Son básicamente, imágenes en crudo obtenidas del detector utilizando cualquiera de los comandos de adquisición desarrollados. Cada uno de los píxeles de la imagen contiene información de 256 canales de energía. Cada uno de estos canales dispone de 32 bits para codificar el número de cuentas correspondiente.

A partir de los ficheros .raw podemos construir la imagen de llenado de campo, ver figura 4.21

7.1.1.3 Formato del archivo lut

El criterio utilizado para la identificación de los diferentes cristales presentes en cada detector del sistema, se detalla en la siguiente figura:

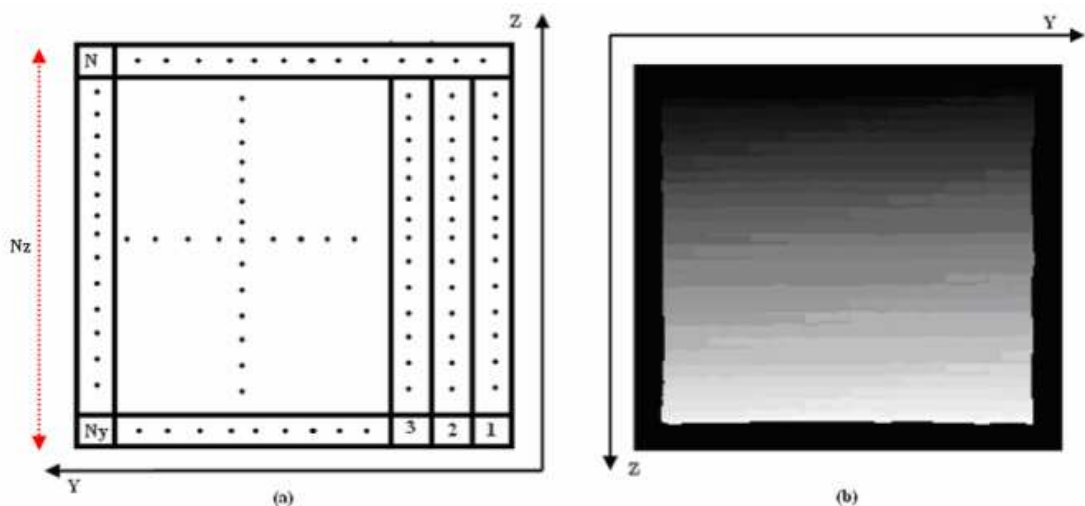


Fig 7.2.-La figura (a) representa el criterio de numeración de cristales de cada detector. La figura (b) representa una LUT de cristales de las generadas por el programa interface_LUTs.

La figura. (a) representa la numeración de los cristales en cada detector. Los ejes Z e Y dibujados coinciden con el sistema de referencia especificado para cada tubo, además:

- N y hace referencia al número de cristales distinguibles en la dirección transaxial.
- Nz hace referencia al número de cristales distinguibles en la dirección axial.
- N es el número de cristales totales que podemos distinguir en el detector (en el histograma de llenado de campo del mismo) que evidentemente es igual a Nz x Ny.

En la figura (b) se representa una LUT de cristales de las utilizadas. La equivalencia entre las dos figuras es la siguiente, cada cristal de la figura (a) equivale con un cierto nivel de gris en la figura (b), así el cristal 1 de (a) se corresponde en la imagen (b) con los píxeles cuyo valor es 1 y el cristal N en (a) se corresponde en (b) con los píxeles cuyo nivel de gris es N. De esta forma, el pasar de coordenadas de imagen [0...255] a cristal, puede realizarse vía software con una sencilla indexación.

7.1.2 Ficheros de salida

7.1.2.1 Formato del fichero archives.txt

Archivo que contiene los nombres de todos los archivos necesarios para el funcionamiento del tomógrafo.

TipoDeConfiguracion	NombreFichero
#motor_params_SPECT	pspect.txt
#SPECT_params	SPECT_params.txt
#offsets	offset_ventana_04_Mar_2011.crc
#isotopes	isotopes.txt
#collimators	collimators.txt
#uniformity	uniformity_v20_d1__26_feb_2009.sns uniformity_v20_d2__26_feb_2009.sns
#luts	lut_det1_29_enero lut_det2_29_enero
#cor_Parallel_LEHR	alignment_d12__5_3_2009.cor
#cor_Pinhole_075	alignment_d12__11_2_2009.cor0.525906

Tabla 3.- Fichero archives.txt

7.1.2.2 Formato del fichero de calibración por pedestales “.CRC”

Este fichero se genera como resultado de la calibración ACQ SYSTEM.

Detector1	Detector2
Pos_Max_canal_1_dec_1	Pos_Max_canal_1_dec_2
Pos_Max_canal_2_dec_1	Pos_Max_canal_2_dec_2
Pos_Max_canal_3_dec_1	Pos_Max_canal_3_dec_2
Pos_Max_canal_4_dec_1	Pos_Max_canal_4_dec_2
Pos_Max_canal_5_dec_1	Pos_Max_canal_5_dec_2
Pos_Max_canal_6_dec_1	Pos_Max_canal_6_dec_2
FWHM_Max_canal_1_dec_1	FWHM_Max_canal_1_dec_2
FWHM_Max_canal_2_dec_1	FWHM_Max_canal_2_dec_2
FWHM_Max_canal_3_dec_1	FWHM_Max_canal_3_dec_2
FWHM_Max_canal_4_dec_1	FWHM_Max_canal_4_dec_2
FWHM_Max_canal_5_dec_1	FWHM_Max_canal_5_dec_2
FWHM_Max_canal_6_dec_1	FWHM_Max_canal_6_dec_2
SHIFT_TDC_Det_1	SHIFT_TDC_Det_2

Tabla 4 .- Formato del fichero de salida para la calibración de los pedestals de nombre: "offsets_ventana_dia_mes_año.crc"

Offset_calibration_dia_mes_año.crc	
28	29
27	27
28	27
25	26
26	24
29	27
0.997463	1.23349
0.700799	0.733880
1.18368	0.752948
0.801799	0.762178
0.869807	0.631303
0.766880	0.831881
0	3

Tabla 5.- Resultado práctico de la calibración por pedestales.

7.1.2.3 Formato del fichero de calibración “.SNS”

Los archivos “.sns” son los utilizados por la interfaz para realizar la corrección de uniformidad descrita en el apartado (4.3.4) del presente documento. El archivo es legible en ASCII y presenta el siguiente formato:

Pos	Nº Cristal	Fac_ajuste	Desplazamiento	Fac_uniformidad
0	0	1	-67	11,1705
0,1	1	1	-67	17,1238
0,2	2	1,72917	27	1,69442
0,3	3	1,55172	19	0,906587
0,4	4	1	-47	1,57912
0,5	5	1	-43	1,46443
0,6	6	1,38983	19	1,49443
0,7	7	1	-48	1,38019
0,8	8	1	-55	2,11548
0,9	9	1	-52	2,07869
0,1	10	1	-44	1,1725
...

Tabla 6 .- Fichero de calibración por uniformidad

El fichero está estructurado en cinco columnas cuyo significado es el siguiente:

Pos.-Indica la posición del píxel desde (0,0) hasta (29,29).

N_cristal.- Se le asigna un identificador a cada píxel, de valor entre 0 y 899, para un procesado más sencillo.

Fac_ajuste.- Dato para pasar de canales a KeV. Valor utilizado para realizar un escalo en los espectros de energía de cada píxel.

Desplazamiento.- Son los valores del mapa de corrección de energía. Indican el número de canales que habría que desplazar el espectro de un determinado píxel, para ajustarlo al espectro de referencia, cuyo canal del fotopico es el típico del isótopo utilizado.

Fac_uniformidad.- Es el valor calculado como la media de la imagen binned a cristales del CFOV entre el valor de cada cristal.

2	2	2	2	4
2	2	3	4	4
0	3	3	3	4
3	2	3	4	4
3	3	4	4	4

$$\text{Media_total} / \text{valor_pixel} = 2.72/2 = 1.36$$

Fig 7.3 .- Número de cuentas

7.1.2.4 Formato fichero de salida parameter.txt

Cuando realizamos la calibración de alineamientos, 'Pinhole Geometry' uno de los ficheros de salida que generamos al llamar a PinholeCalibration.exe es parameter.txt.

focal	4.50538
radio	38.23472
tilt	0.05487
twist	-0.00753
m	1.41974
eu	-1.63565
ev	0.27314
f.coste	0.30702

Tabla 7.-Resultado práctico de la calibración pinhole geometry.

Parameter.txt

Focal.- Se relaciona con el valor de la distancia focal.**Radio.-** Es el valor del radio de rotación.**Tilt.-** Es la inclinación.**Twist.-** Se corresponde con el valor del giro.**M.-** Corresponde con MPH.**Eu.-** Es el cambio electrónico en la proyección para el eje y**Ev.-** Es el cambio electrónico en la proyección para el eje z.**F.coste.-** corresponde con la función de coste.

7.1.2.5 Formato fichero de salida center.txt

Cuando realizamos la calibración de alineamientos, 'Pinhole Geometry' otro de los ficheros de salida que generamos al llamar a PinholeCalibration.exe es center.txt. Donde recogemos la posición de centros de los puntos de proyección para cada canal.

-0.12	-1.24	-0.06	-0.03	-0.11	1.32
-0.29	-1.23	0.04	-0.03	-0.26	1.32
-0.44	-1.21	0.13	-0.02	-0.41	1.32
-0.58	-1.19	0.23	-0.02	-0.56	1.31
-0.72	-1.17	0.33	-0.01	-0.70	1.29
-0.83	-1.14	0.41	-0.00	-0.81	1.27
-0.93	-1.11	0.51	0.00	-0.91	1.25
-1.03	-1.07	0.59	0.01	-0.99	1.22
-1.09	-1.04	0.68	0.02	-1.06	1.20
-1.14	-1.01	0.76	0.02	-1.11	1.17
-1.17	-0.98	0.84	0.02	-1.15	1.14
...

Tabla 8.-Resultado práctico de la calibración pinhole geometry.

7.1.2.6 FICHERO CONFIGFILE SPECT.TXT:

Fichero implementado para fijar parámetros utilizados en el software FSPECT.

Descripción de los parámetros.

Parámetros de la consola de calibración:

- **N_CHANNEL:** Indica el número de canales con los que cuenta el sistema FSPECT, para nuestro caso serán 6 (Xa, Xb, Ya, Yb, E, T).
- **D_RANGE:** Rango fijado para representar los canales de energía en el eje x.
- **FIT_BIN:** Factor que utilizamos para comprobar los ajustes bin de FWHM.
- **TAM_IMG:** Tamaño de la imagen.
- **KERNEL:** Filtro que se utiliza para realizar el suavizado en la imagen.
- **N_DET:** Número de detectores Del sistema FSPECT.
- **N_CRYSTAL:** Número de cristales.
- **N_PACKAGES:** Número de paquete que se utilizan para obtener adquirir en modo offset y timeshift.
- **NAME_ARCHIVES:** Nombre fijado del fichero que alberga nombres de los fichero de corrección.
- **GAUSS_SIZE:** Factor que utilizamos para definir el tamaño de la gaussiana.

Parámetros fijados para la llamada de PinholeCalibration.exe y MatrixCalibration.exe

- **DISTANCE_12:** Distancia 1 relacionada con el maniquí de calibración por pinhole.
- **DISTANCE_23:** Distancia 2 relacionada con el maniquí de calibración por pinhole.
- **DISTANCE_13:** Distancia 3 relacionada con el maniquí de calibración por pinhole.
- **TBIN:** Tamaño del píxel en la proyección.
- **H_PH_INIT:** Valor inicial focal, medido en mm.
- **H_PH_ITER:** Ajuste del valor inicial focal con iteración.
- **R_PROJ_ITER:** Valor inicial del radio de rotación, medido en mm. Distancia a la apertura pinhole.
- **TILT_INIT:** Valor inicial del radio de inclinación.
- **TILT_ITER:** Ajuste inicial del valor de inclinación con iteración. **TWIST_INIT:** Valor inicial del radio de giro.
- **TWIST_ITER:** Ajuste inicial del valor de giro con iteración.
- **EU_INIT:** Parámetro fijado para el uso de PinholeCalibration.exe
- **EU_ITER:** Ajuste inicial del parámetro eu con iteración. Parámetro fijado para el uso de PinholeCalibration.exe
- **EV_INIT:** Valor inicial del parámetro ev. Parámetro fijado para el uso de PinholeCalibration.exe
- **EV_ITER:** Ajuste inicial del parámetro ev con iteración. Parámetro fijado para el uso de PinholeCalibration.exe
- **M_INIT:** Valor inicial del parámetro m. Parámetro fijado para el uso de PinholeCalibration.exe
- **M_ITER:** Ajuste inicial del parámetro m con iteración. Parámetro fijado para el uso de PinholeCalibration.exe
- **NAME_FILE_OUT_CALIBRATE:** Nombre del fichero de calibración de salida que contienen los parámetros de calibración utilizado en PinholeCalibration.exe
- **NAME_FILE_OUT_CENTER:** Nombre del fichero de salida que contiene los centros de rotación utilizado en PinholeCalibration.exe.

Paths utilizados en calibración:

- **PATH_CALIBRATION:**
Path donde se almacenan los ficheros de corrección por uniformidad.
- **PATH_CALIBRATION_CORR:**
Path donde se almacenan los ficheros de adquisición y corrección para

ACQ-SYSTEM.

Parámetros de la consola de usuario para adquisición y reconstrucción.

Paths destacados del PC de USUARIO:

- **PATH_MMWKS:** Path desde donde se arranca la consola denominada MMWKS (Multimodality Work Station).
- **PATH_USERS:** Path reservado al usuario, donde se almacenarán las adquisiciones realizadas dentro del directorio especificado por el usuario.

Path destacados del PC de CONTROL:

- **PATH_TEMP:** Directorio que contiene todos los datos del último estudio tomográfico realizado.
- **PATH_DAQ:** Path donde se encuentra almacenado el software de adquisición y control del tomógrafo.
- **PATH_CAL:** Path específico para las adquisiciones de calibración y programas necesarios en la interfaz de calibración.

Información del PC de CONTROL:

- **IP_DIR:** Dirección IP del PC de CONTROL.
- **IP_USER:** Usuario del PC de CONTROL.

Nombres de los programas utilizados en la aplicación FSPECT:

- **PROG_DAQ_SPECT:** Nombre del software de adquisición y control.
- **SCRIPT_DAQ_SPECT:** Nombre del script que realiza la llamada al software de adquisición y control.
- **PROG_OFFSETS:** Nombre del programa utilizado para generar el fichero offsets.dmp.
- **PROG_TIMEShift:** Nombre del programa utilizado para generar el fichero timeshift.dmp.

Información sobre las imágenes que captan los detectores y que son mostradas en la interfaz de adquisición:

- **RTIMAGE_NAME_DET1:** Nombre de la imagen que capta el detector 1.raw.
- **RTIMAGE_NAME_DET2:** Nombre de la imagen que capta el detector 2.raw.
- **RTIMAGE_DIMX:** Tamaño en cristales de la imagen en el eje x.
- **RTIMAGE_DIMY:** Tamaño en cristales de la imagen en el eje y.
- **RTIMAGE_TYPE:** Número entero que representa el tipo de dato de las imágenes, en este caso se trata de tipo FLOAT, que teniendo en cuenta el lenguaje de programación IDL se corresponde con el número 12.

7.2 RUTAS FICHEROS

9.1 Path en Linux SPECT	/home/lacayo/SPECT/
9.2 Destino fichero offset y timeshift	C:\last\SPECT\OSEM_SPECT\corr\
9.3 Ficheros de calibración generados.	/home/lacayo/SPECT/Calibration
9.4 Fichero de calibración por uniformidad	C:\last\USERS\QC\IMAGES\CURRENT_SPECT\CORRECTION_FILES\uniformity\uniformity\uniformity_dia_mes_anio.sns
9.5 Imagen de llenado de campo	\CURRENT_SPECT\SPECT_PROY\det_X_frame_1_bec_1_spin1_proy_0_superYZ_00.raw
9.6 Destino de archives.txt en Linux	/home/lacayo/spect/current_spect
9.7 Destino de adquisición para estudio pinhole	C:\last\USERS\QC\IMAGES

Tabla 9 .- Tabla con las rutas de los ficheros in/out del sistema FSPECT

7.3 PARÁMETROS PINHOLECALIBRATION.EXE

Parámetros de entrada	Descripción
Fichero_proj	Nombre del fichero de proyección ya calibrado, se debe incluir su path o dirección destino
Nbins	Número de contenedor en la proyección. Dato leído desde el fichero.acq.
Tbin	Tamaño del píxel en la proyección. Dato leído desde el config file.
Parameter_out	Fichero de salida .txt que contiene los resultados de la calibración
Gauss_size	Parámetro que se utiliza para aplicar el ajuste gaussiano. Dato leído desde el config_file.
Distance_12	Distancia 1 que existe entre los vértices del triángulo isósceles del phantoma de calibración. Dato leído desde el config file.
Distance_23	Distancia 2 que existe entre los vértices del triángulo isósceles del phantoma de calibración. Dato leído desde el config file.
Distance_13	Distancia 3 que existe entre los vértices del triángulo isósceles del phantoma de calibración. Dato leído desde el config file.
Limit down	Fila en la proyección en la cual no hay solapamiento entre los píxeles inferiores y centrales. Dato calculado desde la propia interfaz de usuario.
Limit up	Fila en la proyección en la cual no hay solapamiento entre los píxeles superiores y centrales. Dato leído desde la propia interfaz de usuario.
H_ph_init	Valor inicial focal, medido en mm. Dato leído desde el config_file.
H_ph_iter	Ajuste del valor inicial focal con iteración. Dato leído desde el config_file
R_proj_init	Valor inicial del radio de rotación, medido en mm. Distancia a la apertura pinhole. Dato leído desde el fichero.acq
R_proj_iter	Ajuste del valor inicial del radio con iteraciones. Dato leído desde el fichero.acq
Tilt_init	Valor inicial del radio de inclinación. Dato leído desde el config_file.
Tilt_iter	Ajuste inicial del valor de inclinación con iteración. Dato leído desde el config_file.
Twist_init	Valor inicial del radio de giro. Dato leído desde el config_file.
Twist_iter	Ajuste inicial del valor de giro con iteración. Dato leído desde el config_file.
Eu_init	Valor inicial del parámetro eu. Dato leído desde el config_file.
Eu_iter	Ajuste inicial del parámetro eu con iteración. Dato leído desde el config_file.
Ev_init	Valor inicial del parámetro ev. Dato leído desde el config_file.

Ev_iter	Ajuste inicial del parámetro ev con iteración. Dato leído desde el config_file.
M_init	Valor inicial del parámetro m. Dato leído desde el config_file.
M_iter	Ajuste inicial del parámetro m con iteración. Dato leído desde el config_file.
Center_out	Nombre del fichero .txt donde se incluye la posición de los centros de los puntos de proyección. Dato leído desde el config_file.
Parámetros de salida	
Error file	Fichero.txt donde el programa escribe el mensaje de error en caso de que se produzca.
Parameter_out	Fichero .txt donde se guardan los resultados de los parámetros de calibración.
Center_out	Fichero .txt donde se guardan los resultados de los centros de puntos de proyección.

Tabla 10.- Parámetros de entrada y salida para PinholeCalibration.exe

Más detalles en el manual de usuario [17].

7.4 PARÁMETROS MATRIXGENERATIONPINHOLE.EXE

Parámetros de entrada	Descripción
Nom_fitxer	Nombre de la matriz, al cual es necesario añadirle su path o dirección destino. Este parámetro lo recoge de Name matrix de la interfaz que se muestra en pinhole geometry.
d_ph	Diámetro de agujero del colimador pinhole en cm. Dato recogido del fichero config_file.
Nfil	Píxel de reconstrucción, dato leído del fichero config_file.
Tpix	Tamaño del píxel de la imagen en cm. Dato leído desde el fichero config_file.
Tpix_z	Espesor de la rodaja, se calcula como $2 \cdot \text{tpix}$.
Ntall	Número de rodajas en la reconstrucción de la imagen.
Nbins	Número de cristales de la proyección. En la dirección transversal del eje de rotación.
Ntalls_b	Número de cristales de la proyección. En la dirección paralela del eje de rotación.
Tbin.-	Tamaño del píxel en la proyección. Dato leído desde el config_file.
Nangles	Número de las proyecciones. Dato leído desde el fichero.acq.
NOS	Número de subconjuntos. Fijado a 1 para colimadores pinhole
Increment	Angulo de aumento, medido en grados.
Fitxer_mapa_ate	Mapa de atenuación. Dato leído desde el fichero config_file.
R_proj	Valor del radio de rotación, medido en cm. Distancia al cristal centellador. Dato leído desde el fichero.acq.
Hph	Distancia focal del colimador pinhole, medido en cm.
Mph	Parámetro m, medido en cm. Dato leído desde el fichero parameter_det.txt, fichero de salida generado al llamar a PinholeCalibration.exe.
Twist	Valor del giro, medido en radianes. Dato leído desde el fichero parameter_det.txt, fichero de salida generado al llamar a PinholeCalibration.exe.
Eu	Cambio electrónico en la proyección, para el eje y, medido en cm. Dato leído desde el fichero parameter_det.txt, fichero de salida generado al llamar a PinholeCalibration.exe.
Ev	Cambio electrónico en la proyección, para el eje z, medido en cm. Dato leído desde el fichero parameter_det.txt, fichero de salida generado al llamar a PinholeCalibration.exe.

Tilt	Inclinación. Dato leído desde el config_file.
Parámetros de salida	
Matrix	Fichero de nombre matrix_det_dia_mes_año, necesario para la reconstrucción.
File_error	Fichero que devuelve un -1 en caso de existir algún error.

Tabla 11.- Parámetros de entrada y salida para MatrixGenerationPinhole.exe

Más detalles en el manual de usuario **[17]**.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] José Luis Villena Lozano, 'Desarrollo de un sistema de adquisición de datos para tomógrafo SPECT de animales de laboratorio'. PFC, Universidad Politécnica de Madrid, 2008
- [2] Maribel Narváez, Eva Merello, Concha Toribio, José M^a Benlloch, 'Diagnóstico por Imagen, Estudio de Prospectiva', Fundación OPTI y FENIN, 2009, http://www.fenin.es/pdf/diagnostico_imagen.pdf
- [3] Eduardo Lage Negro, 'Sistema tomográficos multimodalidad para animales de laboratorio'. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2010
- [4] Gengsheng L Z and Daniel G 2004 CdZnTe strip detector SPECT imaging with a slit collimator *Phys Med Biol* 49 2257-71
- [5] Del Guerra A, Bartoli A, Belcari N, Herbert D, Motta A, Vaiano A, Di Domenico G, Sabba N, Moretti E, Zavattini G, Lazzarotti M, Sensi L, Larobina M and Uccelli L 2006 Performance evaluation of the Fully Engineered YAP-(S)PET Scanner for Small Animal Imaging *IEEE Transactions on Nuclear Science* 53 1078 – 83
- [6] Cherry S R, Sorenson J A and Phelps M E 2003 Physics in Nuclear Medicine.
- [7] Hamamatsu Photonics. "*Photomultiplier Tubes, Basics and Applications*", Hamamatsu Electron Tube Division, 2006
- [8] Jaszczack R J, Li J , Wang H, Zalutsky MR and R.E C 1994 Pinhole Colimeter for ultra-high-resolution, small-field-of-view SPECT. *Phy Med Biol* 39 425-37
- [9] Pascau J, Vaquero J J, Abella Mónica Cacho R, Lage E and Desco M, 2006, Multimodality for small animal image visualization and análisis. *Molecular Imaging and Biology*.
- [10] Eduardo Lage, LIM, 2009, Manual Offset y Timeshift
- [11] Hoffman E J, Guerrero T M, Germano G, Digby W M, Dahlbom M and Joseph P 1989 PET system calibrations and corrections for quantitative and spatially accurate images *IEEE Transactions on nuclear science* 36 1108-12
- [12] Eduardo Lage y Verónica García, LIM, 2009. Manual de Interfaz Lut
- [13] Bequé D, Nuyts J, Bormans G, Suetens P and Dupont P 2003 Characterization of pinhole SPECT acquisition geometry *IEEE Trans Med Imaging* 22 599-612

- [14] E Lage, JL Villena, G Tapias, NP Martínez, ML Soto-Montenegro, M Abella, A Sisniega, F Pino, D Ros, J Pavía, M Desco, JJ Vaquero. "A SPECT Scanner for Rodent Imaging Based on Small-Area Gamma Cameras". IEEE T Nucl Sci, 57(5): 2524-2531, 2010
- [15] Beekman F, van der Have F, Vastenhouw B, van der Linden A, van Rijk P, Burbach J P and Smidt M 2005 U-SPECT-I: A Novel System for Submillimeter-Resolution Tomography with Radiolabeled Molecules in Mice *The Journal of Nuclear Medicine* **46** 1194-200
- [16] Badawi R D and Marsden P K 1999a Developments in component-based normalization for 3D PET Phys Med Biol
- [17] Mónica Abella y Francisco Pino, User manual for RecoOsem3d_ph, LIM, 2011
- [18] Manual de IDL "IDL cookBook",
http://132.248.1.102/%7Emorisset/idl_cours/IDL/index_local.htm
- [19] Álvaro de Carlos Mendizábal, 'Desarrollo del sistema de posicionamiento de un tomógrafo MicroSPECT y aplicación al proceso de calibrado'. PFC, Universidad Politécnica de Valencia, 2007
- [20] "Lage, E., et al., *Data acquisition electronics for gamma ray emission tomography using width-modulated leading-edge discriminators*. Phys Med Biol, 2010. 55(15): p. 4291-308.
- [21] Townsed D, Bendriem B, Defrise M, Kinahan P E and Bailey D L 1998 *The theory and Practice of 3D PET*: Kluwer academic publishers)
- [22] Aurora Olmo, 'Desarrollo de interfaces de adquisición de datos y reconstrucción de imagen para tomógrafo SPECT de animales de laboratorio'. Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [23] A.Olmo, G.Zamora, C.García-Villalba, V.García-Vázquez, E.Lage, M.Abella, J.J.Vaquero, M. Desco, Interfaz de usuario para la adquisición de datos, calibración y reconstrucción de imagen para tomógrafo SPECT de animales de laboratorio. XXIX